



## PROYECTO FIN DE CARRERA

Centro Politécnico Superior

Ingeniería Industrial

Curso 2009-2010



# METODOLOGÍA PARA LA ÓPTIMA INTEGRACIÓN DE VISIÓN POR COMPUTADORA EN LA PRODUCCIÓN

**AUTOR: ÓSCAR SALINAS RUIZ**

Ponente: **Jorge Santolaria Mazo**

Profesor Universidad Zaragoza

Departamento de Diseño y Fabricación



Directores: **Martin Harding, Ulrich Koßmann**

Profesores Universidad RWTH Aachen (Alemania)

Departamento de Producción, Metrología y Calidad



Zaragoza Junio 2010



## Agradecimientos

*A mi familia, por su apoyo,  
especialmente a mis padres y Magnolia  
por sus consejos en los momentos difíciles.*

*A mis amigos, por su apoyo y ayuda,  
haciendo los momentos de estudio  
más amenos y fructíferos.*

*A la universidad RWTH de Aachen,  
por las oportunidades y facilidades brindadas,  
especialmente a M.Harding y U.Koßmann,  
por su ayuda con el proyecto.*

*A los profesores, por guiarme  
durante todo mi proceso educativo.*



## Tabla de contenidos

<b>Tabla de contenidos</b>	<b>5</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>7</b>
<b>Índice de ilustraciones</b>	<b>8</b>
<b>1. Introducción: Metrología y Producción</b>	<b>9</b>
<b>2. Metrología en la línea de producción</b>	<b>12</b>
2.1 Actual estructuración de la relación metrología-producción	13
2.2 Características	14
2.3 Conclusión	20
<b>3. Modelo teórico propuesto</b>	<b>21</b>
3.1 Clasificación de la metrología en la producción	21
3.1.1 Metrología no integrada	22
3.1.2 Metrología integrada	25
3.2 Conclusiones del estudio en la feria internacional visión '09	28
3.3 Modelo de decisión	29
<b>4. Modelo de decisión para la optima selección del sistema de medición</b>	<b>32</b>
4.1 Guía técnica	33
4.1.1 Cámara	33
4.1.2 Iluminación	38
4.1.3 Protecciones	42
4.2 Selección final	43
<b>5. Ejemplo de aplicación: Detectar impurezas y fallos en ranuras de tornillos</b>	<b>46</b>
5.1 Descripción de la aplicación	46
5.2 Aplicación del modelo de decisión	48
5.2.1 Selección de la estructura metrología-producción	48
5.2.2 Selección del sistema de medición	51
5.3 Validación	57
<b>6. Resumen y conclusiones</b>	<b>62</b>

---

<b>II. Anexos.....</b>	<b>65</b>
II.1    Diferentes clasificaciones para la metrología en la producción.....	66
II.2    Encuesta en la feria internacional Vision 2009 Stuttgart.....	68
II.3    Criterios de selección de los valores de características.....	73
II.4    Directiva para sistemas de visión por cámara.....	78
<b>Bibliografía.....</b>	<b>87</b>

## Índice de tablas

Tabla 2.1: Comparación entre características de CMP en dos estructuras .....	14
Tabla 2.2: Variación de las características entre metrología integrada y no integrada.....	19
Tabla 3.1: Características de la categoría far-offline.....	23
Tabla 3.2: Características de la categoría near off-line.....	24
Tabla 3.3: Características de la categoría in-line .....	26
Tabla 3.4: Características de la categoría in-situ .....	27
Tabla 3.5: Relación valores de características y categorías metrología-producción. ....	31
Tabla 4.1: Transferencia de datos y longitud máxima para distintas interfaces.....	37
Tabla 4.2: Características de las fuentes de iluminación.....	41
Tabla 4.3: Modelo de la lista de requerimientos.....	44
Tabla 4.4: Lista de evaluación.....	45
Tabla 5.1: Valores y prioridades de las características.....	48
Tabla 5.2: Resultados del modelo de decisión.....	49
Tabla 5.3: Características y ratios de puntuación. ....	49
Tabla 5.4: Traducción de los ratios a porcentajes.....	49
Tabla 5.4: Lista de requerimientos de la cámara. ....	55
Tabla 5.5: Lista de requerimientos para iluminación.....	56
Tabla 5.6: Comparación de resultados. ....	59

## Índice de ilustraciones

Figura 2.1: Posibilidades del control avanzado .....	12
Figura 2.2: Diferentes clasificaciones y términos para estructurar metrología-producción. ....	13
Figura 3.1: Clasificación de la Metrología en la Producción. ....	21
Figura 3.2: Proceso con metrología far off-line. ....	23
Figura 3.3: Proceso con metrología near Off-line. ....	24
Figura 3.4: Proceso con metrología in-line.....	26
Figura 3.5: Proceso con metrología in-situ.....	27
Figura 4.1: Características de la cámara .....	34
Figura 4.2: Problemas de distorsión en las lentes .....	36
Figura 4.3: Características del sistema de iluminación .....	39
Figura 4.4: Distintos tipos de geometría de sistemas de evaluación .....	40
Figura 4.5: Espectro visual .....	41
Figura 4.6: Diferentes formas de iluminación .....	42
Figura 5.1: Ejemplos de defectos en la ranura de tornillos. ....	47
Figura 5.2: Estructura In-line para la aplicación. ....	50
Figura 5.3: Características y componentes de la cámara para la aplicación. ....	53
Figura 5.4: Características del sistema de iluminación requeridas. ....	54
Figura 5.5: Diferentes puntuaciones para cada estructura. ....	58
Figura 5.6: Porcentaje de características completadas por cada estructura. ....	58
Figura 5.7: Aplicación real.....	60
Figura 5.8: Distintos resultados.....	61



# 1. Introducción: Metrología y Producción

El presente proyecto fin de carrera es el resultado de la colaboración entre universidades dentro del programa de intercambio europeo Erasmus. El proyecto ha sido desarrollado en la universidad Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) de Aachen, una de las universidades alemanas más prestigiosas. La Universidad RWTH es reconocida en Europa como una de las mejores universidades en la titulación de Ingeniería Industrial (Maschinen Bau). El proyecto se desarrolló en el departamento de máquina-herramienta y producción (WZL), uno de los más importantes e innovadores de la universidad, conocidos expertos y pioneros en distintos campos dentro de la metrología, producción y calidad.

El proyecto aborda de la relación entre metrología y producción. La metrología proporciona información del proceso, de sus posibles desviaciones, fallos o de los parámetros del producto, mientras que la producción proporciona datos del proceso y de su control. Estos campos de trabajo han pasado de ser independientes a requerir un estudio conjunto debido a los avances técnicos disponibles, a un grado de automatización cada vez mayor y sobre todo a las grandes posibilidades que ofrece su estudio conjunto.

Los beneficios obtenidos de este estudio conjunto se basan principalmente en el intercambio y complementación de la información extraída. De este modo se pueden establecer relaciones causa-efecto de los fallos, tiempos de respuesta rapidísimos, desarrollar el proceso/producto o incluso prevenir futuros fallos.

Los nuevos retos a los que se enfrentan los profesionales hoy en día (por ejemplo tolerancias cada vez más estrechas o mayores velocidades de medición) solo son posibles de afrontar uniendo metrología y producción. En los últimos años el avance tecnológico ha permitido trasladar las herramientas de metrología desde departamentos apartados hasta la misma línea de producción, lo que permite un control más cercano del proceso y nuevas posibilidades. Estas nuevas posibilidades han sido estructuradas y se han establecido clasificaciones por especialistas en el campo de la metrología y producción.

El problema radica en que estos especialistas no han logrado llegar a una solución común, por lo que en la literatura especializada sobre el tema existen múltiples clasificaciones y puntos de vista, así como una terminología específica no unificada. Esta variedad de criterios hace muy complicado establecer los valores de las características de cada categoría por la disparidad de criterios (nula estandarización), imposibilitando una fácil decisión de implantación de la metrología. Este problema se acentúa en el caso de que el usuario no tenga conocimientos teóricos o específicos en el campo.

Tras las argumentaciones anteriores queda demostrado que una clasificación global o “normalizada” es necesaria, acompañada de un modelo para la aplicación práctica de toda la formulación teórica, con el fin de hacerla más asequible a profesionales no especializados en este campo. Desarrollando este modelo teórico-práctico, se reducirá la anterior dependencia en profesionales con gran experiencia en el campo o formados en esta especialidad, facilitando el intercambio de información cliente-fabricante y pasando de estudios individuales (independientes para cada ejemplo) a un modelo común global.

Con el fin de profundizar en mayor grado dentro del campo de la metrología-producción, este proyecto abarca un estudio de la tecnología denominada visión automática (perteneciente al grupo de medición sin contacto). Esta tecnología está siendo desarrollada en la actualidad y ofrece grandes posibilidades que la hacen imponerse a otras opciones, su gran flexibilidad de implantación la hace especialmente interesante para completar el estudio.

El trabajo con la visión automática de este proyecto está enfocado en orientar a usuarios con escaso o nulo conocimiento en esta tecnología y facilitándoles los conocimientos y un método adecuado para la óptima selección del producto y componentes, así como su implantación.

En conclusión este proyecto aborda el problema de la falta de estructuración en la relación metrología-producción, formulando una base teórica en la que se sustenta un método de decisión fácil e intuitivo. A partir de las necesidades del cliente este modelo extrae la óptima estructura producción-metrología y una primera selección de componentes para el sistema de visión automática, pudiendo el cliente expresar sus necesidades de un modo más técnico y claro, reduciendo la necesidad de recurrir a profesionales especializados o con experiencia en el campo.

El presente proyecto está desarrollado en tres fases:

La primera fase explica las actuales clasificaciones y puntos de vista sobre la estructuración de la metrología-producción analizando la teoría existente. Se establece un rango de valores para las características más importantes e influyentes en los resultados de las mediciones tras una intensa búsqueda en textos especializados (segundo capítulo).

La segunda fase se corresponde al desarrollo teórico de la propuesta de estructuración de la metrología-producción realizada (tercer capítulo), tratando de englobar los ya existentes unificándolos de la mejor manera posible. Así mismo se establecen unas categorías estándar, definidas por una serie de valores dentro de las características antes comentadas. Se realiza un estudio de mercado para valorar la interacción entre los mundos industrial y teórico.

En la tercera fase se desarrolla un modelo de decisión que permite trasladar la formulación teórica al mundo industrial de una forma práctica. Tras su uso, profesionales no especializados pueden expresarse en terminología técnica. Este modelo se completa con una guía de los componentes más importantes de visión automática (cámara, iluminación y protecciones) y una pequeña aplicación informática (cuarto capítulo y anexos).

Después de una breve lectura de la guía técnica y el uso de la aplicación informática, el cliente conoce las posibles opciones y seleccionará las que se ajustan a la aplicación requerida (primera selección), pudiendo expresar sus necesidades de forma técnica proporcionando una estimación de los parámetros (resolución, tipo de lente, velocidad...). Con los datos y parámetros del cliente el fabricante hará una segunda selección, ofertando los modelos disponibles para la selección final del cliente. Este modelo de decisión es validado con un ejemplo real y ha sido testeado por 10 ingenieros con resultados satisfactorios (quinto capítulo).

## 2. Metrología en la línea de producción

Establecer la metrología en relación con la línea de producción es uno de los factores más importantes en el desarrollo del producto y del proceso, sobre todo si se hace en los primeros pasos del diseño del producto con el fin de evitar futuros problemas y mejorar el rendimiento del proceso. Las empresas invierten importantes cantidades en metrología y desarrollo para mejorar la calidad del producto y obtener beneficios de mejoras en el proceso de producción (por ejemplo reducir chatarra y falsos positivos). Para hacer esos beneficios lo más elevados posible, la óptima decisión al implantar la metrología en la producción debe ser tomada.

Profesionales se enfrentan continuamente a problemas en los campos de calidad y producción; los procesos se vuelven más complejos, las tolerancias más estrechas, importante reducción del porcentaje de fallos no detectados o falsos positivos. Sin embargo el desarrollo tecnológico da nuevas oportunidades para afrontar esos retos, y el precio de estas nuevas tecnologías es también competitivo (por ejemplo sistemas de visión). Debido a ello existe una tendencia de trasladar la metrología y el control del proceso desde metrología específica fuera de la línea de producción a metrología con un amplio campo de aplicación integrada en la línea de producción.

La siguiente imagen muestra las posibilidades de implantar la metrología en la producción. El control de calidad no es la única función, también es muy importante la información extraída (se convertirá en conocimiento), y el proceso puede ser controlado aguas arriba y aguas abajo, así que los errores pueden ser rápidamente corregidos.

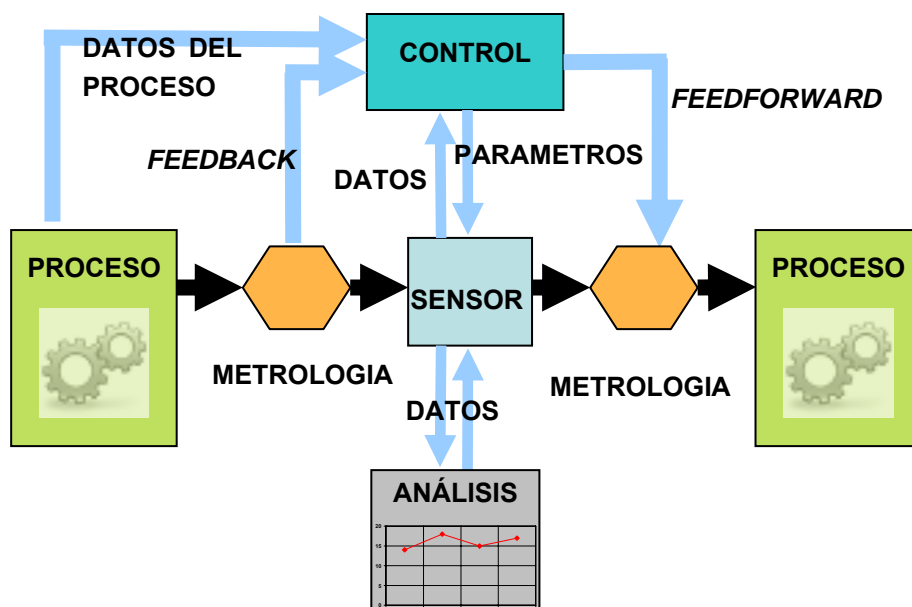


Figura 2.1: Posibilidades del control avanzado. Fuente: [ÖCHS].

## 2.1 Actual estructuración de la relación metrología-producción

Actualmente a pesar de que metrología y producción están íntimamente relacionadas, no existe una clasificación entre las distintas formas de estructurar esa relación, no hay un modelo global que clarifique las distintas características de cada tipo de relación. Muchos autores sugieren diferentes clasificaciones o términos, basados en donde está emplazada la metrología o dependiendo de algunas características o términos. Los límites y diferencias entre las distintas clasificaciones y los valores de las características no están claramente estipulados ni estandarizados.

La clasificación más común es dividir la relación metrología-producción en integrada o no integrada como nivel más simple. De este nivel no se puede sacar mucha información debido a la no estandarización de estos términos y a las distintas definiciones y características atribuidas por cada autor a estos dos niveles. Por ejemplo los distintos puntos de vista respecto a la metrología integrada en la producción, uno a favor debido a sus beneficios de controlar el proceso de forma más cercana y sus ahorros en costes y otro contrario a su utilización debido a los fallos no detectados y el menor uso de estándares. Esto hace la toma de decisiones muy complicada.

El estudio de los niveles más detallados actualmente depende en gran medida de la aplicación o proceso sobre el que trabajen, haciendo muy complicado que la información extraída de ellos puede ser interpolada a un modelo o clasificación global

Aunque la clasificación anteriormente citada es la más generalizada no tiene una única denominación, destacando la variedad de términos usados para definir un tipo, lo que lo hace mas complicado y confuso, sobre todo de personas ajenas a estos estudios teóricos. La figura 2.2 muestra algunos de los diferentes nombres que aparecen en la literatura que versa sobre este tema (revisar anexo I).

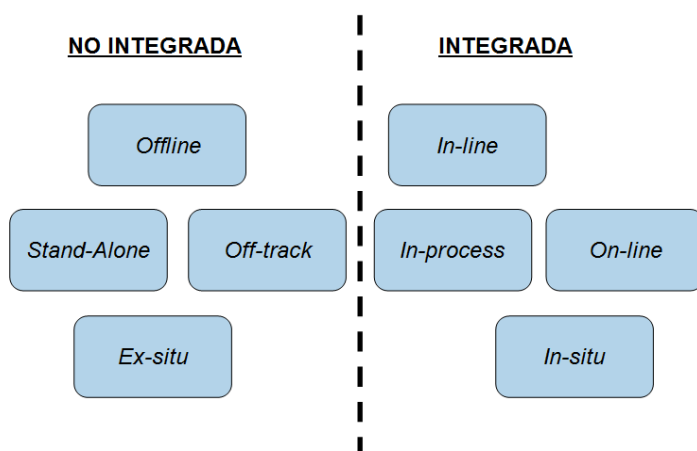


Figura 2.2: Diferentes clasificaciones y términos para estructurar metrología-producción.

## 2.2 Características

En el capítulo 2.1 ha quedado claro que no hay una estructura o clasificación de metrología y producción estándar o globalmente aceptada. De igual modo ocurre con las características propias de las mediciones y su dependencia de la relación metrología-producción. Los valores de cada característica están claros para aplicaciones específicas debido al estudio detallado de cada una, pero no son extrapolables a un modelo global o estándar que marque su dependencia de la relación metrología-producción.

Por ejemplo, tras un estudio para una aplicación de pulido mecánico de un dieléctrico químico (CMP), las características entre dos tipos de estructuras están claras (Tabla 2.1) y permiten tomar una decisión. Pero no se puede extraer información útil para otra aplicación completamente distinta, la cual necesitará otro análisis específico para poder tomar una decisión.

	In-situ	In-line
Mejora de rendimiento	✓	✓
Control en tiempo real	✓	✗
Corrección de la variación del grosor Pre-CMP	✓	✗
Reconocimiento de patrones	✗	✓
Lectura del grosor con precisión	✗	✓
Invariable a variaciones en el proceso	✗	✓
Invariable a las reglas de diseño	✗	✓

**Tabla 2.1: Comparación entre características de CMP en dos estructuras. Fuente: [FANG]**

Este apartado busca extrapolar los valores de dichas características de aplicaciones concretas a un modelo general para un amplio campo de aplicación, una forma de “estandarizar” dichas características. Obviamente no se puede ir hasta un grado máximo de detalle (depende de cada aplicación), pero las tendencias y los valores aproximados de cada una de ellas pueden ser extraídas.

La división entre metrología integrada y no integrada en la producción esta globalmente aceptada por la mayoría de los autores, así que en las siguientes páginas la investigación de las características se dividirá en esas dos clases. La información ha sido extraída de múltiples fuentes (de ahí la importancia de recopilarla en esos dos grupos mayoritariamente aceptados), extrayendo las características con mayor dependencia de la relación metrología-producción y a su vez mas nombradas en la literatura estudiada con mayor frecuencia. Estas características se explican en profundidad a continuación.

Entorno:

Cuando la metrología no esta integrada en la producción, las herramientas de medición se emplazan en las mejores condiciones posibles con el fin de tener un ambiente ideal o “de laboratorio” y de este modo obtener mediciones lo más precisas posibles y no influenciadas por el entorno. En el otro extremo, cuando integramos las herramientas de metrología en la línea de producción deben ser protegidas y más frecuentemente ajustadas (lo que incrementa la complejidad y el coste), debido a las condiciones de trabajo y el entorno. Cuando mas integradas en el proceso están, peores son las condiciones de trabajo (altas temperaturas, impurezas, vibraciones...), el objetivo es limitar la influencia del entorno en los resultados, campo que está siendo desarrollado actualmente.

Mantenimiento:

Esta característica está obviamente relacionada con la dureza del entorno. Los dos puntos principales de este apartado son los intervalos de mantenimiento y la información extraída de ellos, lo que determina sus costes y beneficios económicos. Dichos intervalos pueden ser muy espaciados (herramientas sin gran desgaste y sin un entorno duro). En consecuencia el mantenimiento es más barato pero se desconoce la evolución de las herramientas, su desgaste y cuando podrán fallar (metrología no integrada en producción). En el otro extremo con intervalos de mantenimiento cortos (condiciones de trabajo duras) los costes aumentan, pero extensa información es extraída. Esta información permite hacer un mantenimiento preventivo que puede ser realmente importante en factores como conocer el tiempo idóneo de recambio de piezas, evitar fallos o paradas de producción y reducir tiempo de respuesta ante dichos fallos. Toda esta información se puede traducir en elevados beneficios económicos (metrología no integrada en producción).

Automatización:

En este apartado la diferencia entre metrología integrada o no en la producción es clara. Las herramientas no integradas en la producción suelen ser individuales (“*stand-alone*”) y manejadas por operarios lo que supone que esa parte no esta automatizada o lo esta en una escala baja. La decisión de aceptar una pieza o no es tomada por el operario tras medirla y analizarla. Si por contrario las herramientas están integradas en la producción deben adecuarse al nivel de automatización del proceso que suele ser alto. En este caso no están controladas por operarios, las propias herramientas miden y analizan las piezas y la decisión puede ser tomada automáticamente por software o por el operario que lo controla. Esta modalidad permite una respuesta más rápida ante fallos o desviaciones en la producción. La tendencia actual de automatizar los procesos nos lleva a la segunda opción.

Layout:

Es la característica más visual que diferencia las dos estructuras, ya que se refiere al lugar donde las herramientas de metrología están físicamente emplazadas. La metrología no integrada se sitúa al final de la línea de producción (en una sala con condiciones ideales tipo laboratorio o simplemente separada), lo que conllevará un tiempo de transporte y/o almacenaje y movimientos de la pieza adicionales. Por el contrario si las herramientas están integradas en la línea de producción, de igual modo lo estarán en el layout, evitando tiempos de espera y movimientos innecesarios (especial atención a evitar el peligro de convertirse en cuellos de botella del proceso).

Inversión:

El precio de las herramientas tiene una clara relación con la complejidad, requerimientos de la aplicación y el uso de componentes estandarizados y afianzados en el mercado (coste de propiedad). Los beneficios obtenidos (mejora del rendimiento, reducción del gasto por desechos...) y el coste de aprendizaje e instalación deben ser estudiados de igual modo. Las herramientas para la metrología no integrada en la producción son significativamente más baratas que las de la metrología integrada. Esto se debe mayoritariamente a la menor complejidad y el alto grado de estandarización (sin partes únicas o especiales para una aplicación concreta), además de que han sido desarrolladas durante muchos años y las herramientas integradas solo unos años atrás.

Velocidad de medición:

La velocidad de medición tiene gran relación con el tiempo de producción o el ciclo del producto. Al reducir el tiempo de producción se reduce el riesgo económico ante variaciones de demanda, además de aportar una mayor flexibilidad con los clientes.

En el caso de metrología no integrada en la producción, las mediciones se toman al final por lo que su duración determina el tiempo del proceso. Debido a los tiempos de espera, movimiento adicionales necesarios y que suelen consumir bastante tiempo este incremento puede llegar a ser realmente importante dentro del tiempo global del proceso. Si la metrología esta integrada dentro de la línea de producción debe adaptarse a la velocidad de esta para evitar ser un cuello de botella e incrementar el tiempo total de producción. Esto se consigue con mediciones rápidas (tecnología alta-velocidad) o emplazando las herramientas de medición en un cuello de botella ya existente. Debido a la eliminación de tiempos de espera, mayor rapidez de mediciones y sobre todo al aprovechamiento de cuellos de botella existentes el tiempo total de producción puede reducirse considerablemente, además debido a que la información se obtiene desde el proceso y su respuesta es más rápida puede reducir el ciclo del producto (diseño, desarrollo más rápido).



Tiempo de respuesta:

En las etapas iniciales del diseño se encuentran la mayoría de las causas de los posteriores fallos, por lo que detectarlas lo antes posibles es muy importante y permitirá corregirlas con el mínimo coste. Esa información podrá ser usada igualmente en el diseño de nuevos productos o revisión de diseños y será importante en su lanzamiento.

Este tiempo de respuesta depende de la información y cuanto tarda en ser extraída desde que la pieza es producida. Si se trata de metrología no integrada en la producción, la pieza pasará por todo el proceso y será examinada al final, por lo que la información se extrae al final siendo inutilizable para esa pieza o incluso para todo el lote (si el tiempo requerido para obtener el resultado es muy largo). De este modo los resultados son obtenidos demasiado tarde como para poder establecer medidas correctoras ante fallos. Cuando la metrología esta integrada en la producción la pieza es medida durante o inmediatamente después de ser procesada, por lo que un posible fallo es detectado inmediatamente posibilitando desechar la pieza o repararla antes de continuar con su procesado.

Por enumerar algunas de las consecuencias de reducir el tiempo de respuesta: corregir desviaciones para próximas piezas o lotes rápidamente, reduciendo los lazos de control; aumentar rendimiento, robustez del proceso y resultados; reducir gasto en material, paradas de proceso y personal; reducir trabajo en proceso y añadirle valor debido a la relevancia de los datos, rápida cualificación y aprendizaje del campo y herramienta; reducir riesgo de variaciones de mercado (más flexibilidad ante demandas de clientes), almacenaje y una introducción al mercado más rápida.

Piezas analizadas:

El porcentaje de piezas analizadas depende mayoritariamente del tiempo de medición y determina el tipo de control. La metrología no integrada en la producción consume mucho tiempo lo que imposibilita un análisis de un alto porcentaje de piezas, por ello las técnicas mas usuales son usar “*send-ahead*” (mandar piezas por delante del resto del lote y analizarlas antes de procesarlo) o comprobar solo un porcentaje de piezas del lote (normalmente 20%). Los resultados obtenidos se extrapolan a la totalidad de las piezas y se toma la decisión conforme a ellos. Los inconvenientes de esta técnica son los posibles fallos no detectados, patrones de fallo que pasan desapercibidos si se seleccionan las piezas en el mismo orden para testear y una posible mala decisión respecto a un lote debido a los resultados de las piezas-test. En cambio si la metrología esta integrada en la producción, sus tiempos de medida son significativamente menores lo que permite un alto porcentaje de piezas analizadas o incluso la totalidad de ellas (permite control pieza a pieza y control en tiempo real).

Control de proceso:

Esta es una característica especialmente importante debido a su influencia sobre otras características (fiabilidad de los resultados, fallos no detectados...) y que está íntimamente relacionada con otras características (porcentaje de piezas analizadas, tiempo de respuesta...). Se puede dividir el tipo de control en dos grupos, control por lotes o control por producto.

El control por lotes (típico de metrología no integrada en la producción) supone que tras analizar un porcentaje de las piezas (normalmente menor del 50%), su resultado se extrapola al conjunto del lote y determina la decisión de aceptar o rechazar. Los resultados de las piezas analizadas son muy precisos y fiables pero al quedarse muchas piezas del lote sin analizar, la decisión de aceptar o rechazar el lote puede ser errónea (falsos positivos/negativos), con el gran riesgo de fallos no detectados en las piezas no analizadas. Este tipo de control proporciona excelentes resultados para piezas pero deficiencias en el resultado de los lotes.

El control por producto (típico de metrología integrada en la producción) conlleva analizar todas las piezas o un alto porcentaje de ellas. La decisión se toma casi para cada pieza una vez analizada (lo que permite controles de proceso avanzados como pieza a pieza o incluso en tiempo real). Los resultados de las piezas analizadas no pueden ser muy precisos y fiables debido al analizarlos en un tiempo limitado pudiendo darse falsos positivos/negativos, sin embargo el riesgo de fallos no detectados es bastante reducido. Este tipo de control proporciona muy buenos resultados para lotes y buenos resultados para productos.

Tolerancia:

En primer lugar las piezas deben cumplir las especificaciones del cliente y para ello la apropiada tolerancia debe ser seleccionada, ni muy estrecha (encarecimiento innecesario) ni muy amplia (fallos en análisis). Para muchas aplicaciones no es necesaria una tolerancia o precisión altas y debe ser tenido en cuenta con el fin de no incrementar la complejidad innecesariamente.

Si se midieran el total de las piezas desde metrología no integrada e integrada en la producción, la precisión de la no integrada sería significativamente mayor con una menor desviación en los resultados. Esto se debe a las mejores condiciones de medición y a una mejor calibración. Hay que tener en cuenta debido a las piezas no analizadas, en la metrología no integrada la posible influencia en el resultado global como en otras características ha sido anteriormente explicado.

Robustez:

Cambios externos como condiciones del entorno, ritmo de producción, fallos se trasladan en las mediciones como ruido en el resultado. La metrología no integrada en la producción tiene una gran robustez debida en gran medida a las buenas condiciones del entorno y que al estar situada al final de la línea de producción los cambios en ella no tienen gran influencia en los resultados. Sin embargo si la metrología se encuentra dentro de la línea de producción, cualquier cambio en ella importa e influye en el resultado por lo que la sensibilidad del equipo a esas alteraciones es importante y debe ser estudiada e incluso puede ser necesario el uso de protecciones que limiten dicha influencia.

En la tabla siguiente se muestra la evolución de los valores y la influencia en los resultados al integrar o no la metrología en la producción. Se muestran los valores extremos de cada característica y a simple vista permite hacerse con una idea concisa y clara de las diferencias entre ambas.

Característica	No-integrada	Integrada
Entorno	Ideal	Duro
Mantenimiento	Intervalos largos	Preventivo
Automatización	No	Total
Tipo de Control	Basado en lotes	Basado en producto
Tiempo de respuesta	Alto	Bajo
Layout	No integrada	Integrada
Inversión	Baja	Alta
Tiempo de medida	Alto	Bajo
Piezas analizadas	20%	100%
Tolerancia	Estrecha	Amplia
Robustez	Alta	Baja

**Tabla 2.2: Variación de las características entre metrología integrada y no integrada.**

## 2.3 Conclusión

La principal conclusión tras el estudio detallado de literatura especializada sobre metrología en la producción es que actualmente no hay un “estándar” o modelo comúnmente aceptado que permita clasificar los distintos tipos de relaciones entre producción y metrología. De igual modo al no existir ese modelo global es muy difícil definir como varían los parámetros o características de las mediciones de una estructura a otra. El efecto positivo o negativo de la integración en la producción es difícil de demostrar debido a la gran variedad de clasificaciones, términos y puntos de vista.

La complejidad aumenta hasta cotas muy elevadas si el que se enfrenta al problema es un usuario con escaso o nulo conocimiento de la teoría y terminología de la relación entre metrología y producción. A la hora de tomar una decisión resulta muy complicado elegir una estructura debido a las distintas clasificaciones y la escasa clarificación de las características globales de cada una de ellas.

Por todas estas razones en el siguiente capítulo se desarrolla una clasificación global y que trata de “estandarizar” las relaciones entre metrología y producción, así como proveer cada estructura o categoría de unos valores respecto a las principales características. Estos valores “estandarizados” permitirán una elección más fácil y un mejor conocimiento de todas las posibilidades (no se limitará solo a las conocidas por el usuario), ventajas e inconvenientes a usuarios que desconozcan la teoría y terminología, limitando así su dependencia de profesionales especialistas o de la propia experiencia. Además la toma de decisión en este aspecto permitirá un acceso a conocimientos que podrán ser muy útiles en futuras decisiones.

### 3. Modelo teórico propuesto

En este capítulo se tratará de establecer una clasificación global y estándar de la metrología y será completada con características, ventajas e inconvenientes en cada nivel.

#### 3.1 Clasificación de la metrología en la producción

La clasificación que se propone esta basada en las estructuras más comunes o utilizadas y trata de incluir todos los puntos de vista. Esta basada en la estructuración mayoritaria entre integrada y no integrada, los sub-niveles son modificaciones de la propuesta Björn Damm y Robert Schmitt [SCHM08] y la subdivisión más utilizada de la metrología integrada (ver anexo II.1). Esta clasificación trata de incluir parcialmente o completamente otras clasificaciones, comparando las distintas terminologías y estructuras.

*Metrología No-integrada* – Emplazada aparte de la línea de producción, extrae la información una vez la pieza ha sido producida completamente y el control suele estar basado el lotes. En el nivel inferior se puede dividir en “far-offline” (emplazado en un departamento especialmente diseñado para esa tarea con posible almacenamiento previo) y “near-offline” (emplazado al final de la línea de producción).

*Metrología Integrada* – Las herramientas de metrología están emplazadas en la línea de producción como un paso más en la producción o incluso como un modulo dentro de un proceso o herramienta. En el nivel inferior la metrología integrada se puede dividir en “in-line” (medición justo antes/después de un proceso, integrado como un paso más en la producción y controlado por ella) e “in-situ” (medición durante un proceso como parte de él, integrada en la herramienta del proceso como un modulo y controlado por ella).

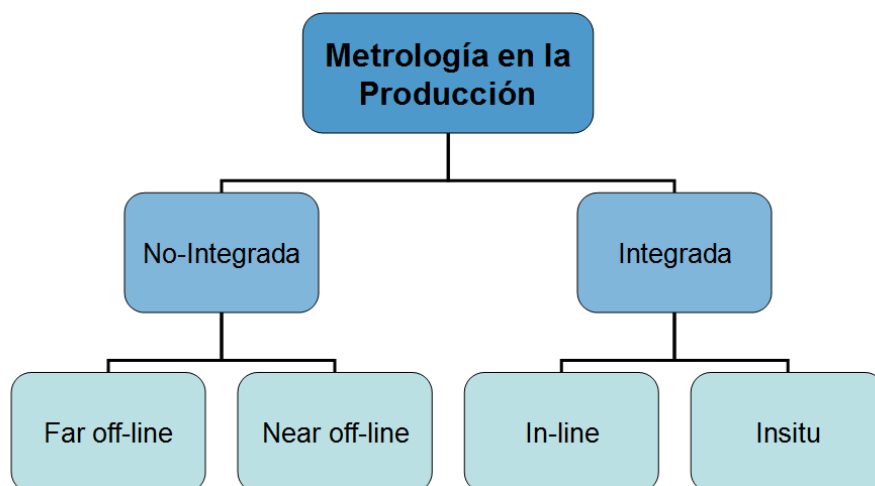


Figura 3.1: Clasificación de la Metrología en la Producción.

### 3.1.1 Metrología no integrada

Este tipo de metrología trabaja de forma independiente a la línea de producción, la pieza es analizada y se controla una vez esta completamente realizada al final de la línea de producción, en un entorno con las mejores condiciones posibles y si es necesario en un laboratorio. La información es extraída al final del proceso, tras un tiempo de análisis y debe recorrer todo el proceso aportando la información al control de este. Debido a la tardanza de obtención de dicha información y a su gran recorrido hasta el control, los fallos solo podrán ser corregidos bastante tiempo después de haber ocurrido (no permite control pieza a pieza o control en tiempo real).

Las herramientas utilizadas en esta categoría son individuales y controladas por operarios experimentados. Las mediciones conllevan un tiempo importante (por lo que es imposible analizar la totalidad de las piezas) pero los resultados son excelentes; estrechas tolerancias, fallos no detectados y falsos positivos/negativos casi nulos. Estos resultados son extrapolados a un mayor conjunto, normalmente llamado lote, lo que hace que los excelentes resultados de las piezas analizadas puedan ser falseados y conducir a una mala decisión respecto al lote, debido a los desconocidos resultados de las piezas no analizadas.

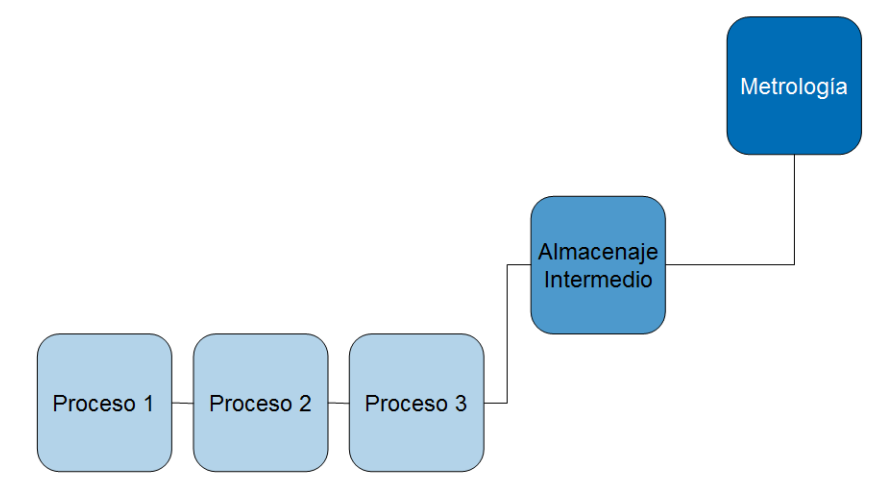
Este tipo de estructura era la más común en la industria hace unos años y formaba parte del departamento de calidad. Otros autores también la denominan *ex-situ*, *offline*, *lot based*, *stand alone* (revisar anexo II.1).

Esta categoría se divide en dos sub-categorías con un nivel de detalle mayor [SCHM08] “far off-line” y “near off-line”. Las características de cada una están expuestas en las tablas 3.1 y 3.2. Sus valores tratan de ser lo más globales posibles, fijando un valor referencia o “estándar” el cual puede variar dependiendo de la aplicación (en ningún caso habrá problemas para empeorar esos valores, por ejemplo tolerancias más amplias al no ser necesaria tan estrecha). Las diferencias más importantes entre estas dos sub-categoría es el porcentaje de piezas analizadas, su diferencia de emplazamiento-condiciones y el tiempo necesario para la medición.

En las tablas 3.1 a 3.4 los valores marcados con (\*) tienen especial relación con el tipo de control como se explico en el capítulo 2.2 y muestran el resultado global de la totalidad de la piezas, mientras que el resultado de las piezas analizadas son diferentes como se explica para cada categoría.

### Far Off-line

Categoría realmente mal integrada en el layout, pues requiere un importante número de movimientos adicionales y tiempos de transporte altos (incluso almacenaje intermedio). Las mediciones tienen lugar en un área o departamento especial para esa tarea con un entorno ideal (tipo “laboratorio”) y son tomadas por expertos (muy poco automatizado) quienes toman la decisión del lote o conjunto conforme con el resultado de las piezas analizadas. Debido al alto tiempo de análisis es común el uso de “send-ahead”, piezas procesadas con anterioridad al resto del lote y que sirven como test preliminares.



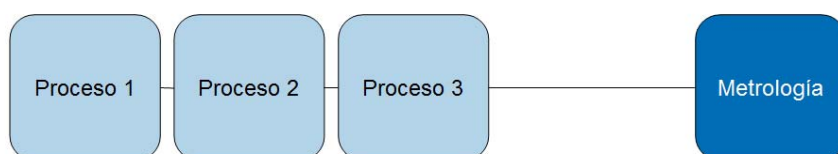
**Figura 3.2: Proceso con metrología far off-line.**

Característica	Valor	Característica	Valor
Entorno	Ideal	Layout	No integrado
Mantenimiento	Largos intervalos	Inversión	Baja
Automatización	Nula	Tolerancia	Muy estrecha
Control	Basado en lotes	Robustez	Alto
Piezas analizadas	<30%	Tiempo de producción	Incremento
Fallos no detectados	Alto*	Tiempo de medición	Alto
Falsos positivos/negativos	Medio*	Tiempo de respuesta	Muy alta

**Tabla 3.1: Características de la categoría far-offline**

Near Off-line

En esta categoría la metrología esta prácticamente integrada en el layout (se emplaza al final de la línea de producción), solo se requiere algún movimiento adicional, pero sigue estableciéndose un tiempo de espera. Las mediciones tienen lugar en un entorno apropiado pero no ideal ni separado y son tomadas en su mayoría por expertos (poca automatización) quienes a su vez toman la decisión para el total de las piezas. Se analiza solo un porcentaje de piezas aunque no es tan reducido como en la categoría anterior y puede llegar hasta dos tercios de la producción.



**Figura 3.3: Proceso con metrología near Off-line.**

Característica	Valor	Característica	Valor
Entorno	Bueno	Layout	Casi Integrado
Mantenimiento	Intervalos medios	Inversión	Baja
Automatización	Escasa	Tolerancia	Estrecha
Control	Basado en lotes	Robustez	Alta-media
Piezas analizadas	30%-60%	Tiempo de producción	Incremento
Fallos no detectados	Medio-Alto*	Tiempo de medición	Medio
Falsos positivos/negativos	Bajo-medio*	Tiempo de respuesta	Alto

**Tabla 3.2: Características de la categoría near off-line**



### 3.1.2 Metrología integrada

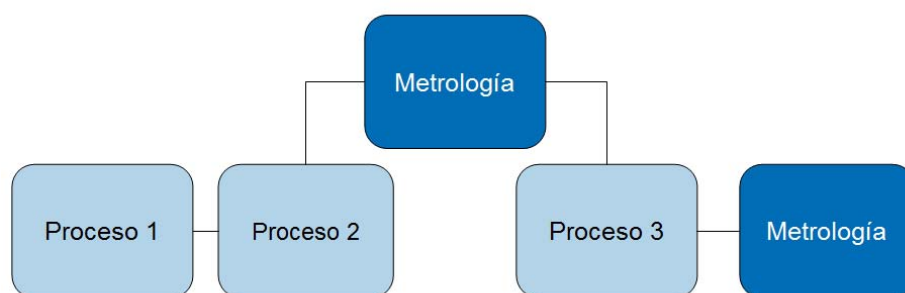
Este tipo de metrología está incluido en la línea de producción, la pieza es analizada y se controla mientras está siendo procesada o momentos después de serlo como una estación de producción más. Por tanto la información es extraída inmediatamente o después de procesarla permitiendo un control muy cercano al proceso (tiempo de respuesta corto). Las condiciones del entorno vienen determinadas por la cercanía al proceso; protecciones e intervalos de mantenimiento continuados son necesarios para aumentar robustez y evitar distorsiones en los resultados. El porcentaje de piezas analizadas es muy alto o incluso la totalidad, por lo que el control está basado en el producto, este hecho junto con el tiempo de medición (rápido determinado por el proceso) determina los valores de características como tolerancia, fallos no detectados y falsos positivos/negativos. Como conclusión los resultados de las piezas analizadas no son tan precisos como en la metrología no integrada pero los resultados globales son significativamente mejores.

La metrología integrada en la producción empezó a ser desarrollada unos años atrás y actualmente se haya en auge y continua evolución, tras vencer las reticencias iniciales al cambio. Los resultados demuestran que obtener la máxima información posible y de la forma más inmediata conlleva grandes avances en el desarrollo del proceso y en importantes beneficios económicos. Algunos autores también denominan a esta categoría *on-line*, *in-process* (revisar anexo II.1).

Esta categoría se divide igualmente que la anterior en dos sub-categorías con un mayor nivel de detalle, “in-line” e “in-situ”. Estas sub-categorías son extraídas de la división más común entre los distintos autores especializados con alguna modificación en su definición. Las características de cada una están expuestas en las tablas 3.3 y 3.4. Al igual que en las anteriores sus valores tratan de ser lo más globales posibles, tipo “estándar”. La diferencia más importante entre estas dos sub-categorías es la posibilidad de realizar en la categoría “in-situ” un control en tiempo real (lo que conlleva mantenimiento preventivo, gran velocidad de medición y altísima automatización). Por otro lado al no necesitar tanta velocidad y establecerse en un entorno no tan duro la categoría in-line proporciona mejores resultados de fallos no detectados, falsos positivos/negativos, tolerancia y robustez, además de tener un precio significativamente menor.

In-line:

La metrología se integra en la línea de producción como una estación más, por lo que las medidas son extraídas justo antes o después del proceso deseado, permitiendo un control pieza a pieza (“run-to-run”). Esta categoría aparece nombrada en la literatura con otros términos como *in-layout*, *on-line*. Tiene ciertas similitudes en las características con la categoría “near off-line” pero el rápido flujo de información y los tiempos de respuesta y medición los distinguen de una manera clara aparte de utilizar un control basado en el producto.



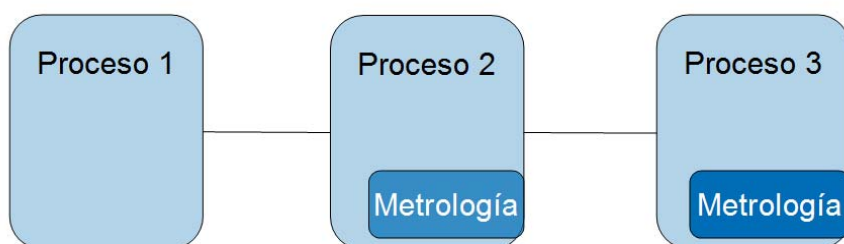
**Figura 3.4: Proceso con metrología in-line.**

Característica	Valor	Característica	Valor
Entorno	Medio	Layout	Integrado
Mantenimiento	Intervalos cortos	Inversión	Media-Alta
Automatización	Media- Alta	Tolerancia	Media
Control	Basado en producto	Robustez	Media
Piezas analizadas	60%-100%	Tiempo de producción	Recorte
Fallos no detectados	Muy bajos*	Tiempo de medición	Corto
Falsos positivos/negativos	Mínimo-bajo*	Tiempo de respuesta	Bajo

**Tabla 3.3: Características de la categoría in-line**

In-situ:

Directamente integrado en la herramienta del proceso y manejado por el mismo control. La información es extraída mientras la pieza es procesada, es controlada en tiempo real y tiene un tiempo de respuesta casi instantáneo, lo que permite mantenimiento preventivo y predicción de errores (realmente interesante para evitar paradas de producción y cambiar herramientas en el momento óptimo). La velocidad de medición debe ser alta, de esta forma todas las piezas son analizadas. Como desventajas más importantes esta el entorno complicado y posibles fallos debidos a ese entorno o a la velocidad de procesado. También es llamado en algunos textos “intrack” o “in-machine”.



**Figura 3.5: Proceso con metrología in-situ.**

Característica	Valor	Característica	Valor
Entorno	Duro	Layout	Integrado
Mantenimiento	Preventivo	Inversión	Alta
Automatización	Alta-muy alta	Tolerancia	Media - amplia
Control	Basado en producto	Robustez	Baja
Piezas analizadas	90%-100%	Tiempo de producción	Recorte - Igual
Fallos no detectados	Medio-bajo*	Tiempo de medición	Muy Corto
Falsos positivos/negativos	Medio*	Tiempo de respuesta	Tiempo real

**Tabla 3.4: Características de la categoría in-situ**

### 3.2 Conclusiones del estudio en la feria internacional visión '09

Toda la formulación teórica del apartado anterior puede resultar complicada y confusa para profesionales no familiarizados con ella o con el campo de la metrología-producción. Con el fin de obtener el punto de vista industrial se realizó una encuesta en la prestigiosa feria internacional de visión 2009 en Stuttgart (ver Anexo II.2). Los profesionales encuestados pertenecen al campo de la metrología de medición sin contacto (cámaras, rayos X, laser...), tanto fabricantes como comerciales y clientes, por lo que conocen en mayor o menor grado la relación metrología-producción.

En los resultados de la encuesta quedo constatado el desconocimiento de la teoría en este campo y solo una cierta familiarización con la terminología tras una breve introducción a ella. Todas las preguntas respecto a la estructuración o distintas categorías de la metrología en la producción fueron contestadas de modo inexacto, arbitrariamente o simplemente desconocían que responder. Al preguntar sobre como estructurarían personalmente la relación entre metrología y producción, la respuesta más común era que el cliente definía donde emplazar la máquina en el proceso (claro desconocimiento de la teoría ya que la relación no se basa únicamente en la ubicación de la metrología) y solo en algunos casos distinguían entre metrología integrada y no integrada en la producción (siendo incapaces de explicar en una base teórica las consecuencias de escoger una u otra). Tras hacerles una pequeña introducción muchos reconocían términos como in-line, in-process pero una vez más sin poder dar una base teórica que sustente esas categorías o sus características.

En cuanto a los valores de las características los encuestados conocían su variación respecto al grado de integración de la metrología en la producción (condiciones entorno, mantenimiento, velocidad de medición...), pero de manera no muy precisa. No manejaban valores globales o "estándar", desde su punto de vista los valores dependían de cada aplicación y las circunstancias que la rodeaban siendo imposible generalizar para procesos o aplicaciones distintas.

Tras este estudio queda demostrado que la interacción entre teoría y práctica es complicada y debe ser estudiada debido a que el usuario final de este trabajo estará en el campo industrial. Una metodología que permita la interacción cómoda y eficiente entre ambos puntos de vista debe ser desarrollada, permitiendo llevar los requerimientos del cliente a la terminología y campo teórico. Además de ser una herramienta para seleccionar la mejor estructura para cada aplicación debe proporcionar una base teórica que sustente la decisión tomada así como sus puntos fuertes y sus desventajas frente a otras posibilidades. Esta metodología debe englobar un campo de aplicación muy amplio facilitando la incorporación al mismo de múltiples tipos de aplicaciones.

### 3.3 Modelo de decisión

Los capítulos anteriores hacen referencia al campo teórico y a sus problemas para trasladarse al mundo industrial de un modo fácil e intuitivo. Para cumplir ese cometido un modelo de decisión se desarrolla en este apartado, que permita a los profesionales seleccionar la estructura adecuada y obtener las características y términos teóricos a partir de sus propias necesidades. De igual modo el resultado mostrará los puntos fuertes y débiles de la estructura seleccionada y como podría variar incrementando o bajando el grado de integración de la metrología.

Las obligaciones del usuario es priorizar sus necesidades y establecer el valor requerido para cada una de ellas. Este modelo de decisión canalizará esas ideas y guiará al usuario durante el proceso. El usuario debe tener en cuenta futuras opciones o cambios para analizar la flexibilidad a la hora de escoger los valores.

Se debe tener en cuenta que la estructura seleccionada no debe reemplazar totalmente todo tipo de metrología existente. Será la óptima estructura para desarrollar la tarea y afrontar los requerimientos planteados por el usuario, pero siempre podrá ser mejorada utilizando una combinación de varias estructuras, las cuales se complementarían entre sí y aportarían una flexibilidad al sistema que lo dotaría de muchas oportunidades ante futuros cambios.

#### Primer paso – Seleccionar la prioridad de las características.

En este paso se establecerá que características son más importantes para el cliente o cuales deben ser obligatoriamente completadas. Para facilitar la selección y hacerla más intuitiva para el cliente solo se tendrán en cuenta cuatro categorías cualitativas bien diferenciadas entre ellas, asignando un valor a cada opción.

- No importante (2,5 puntos) – No supone ningún problema el valor de esas característica.
- Deseable (5 puntos) – El requerimiento no tiene porque ser cumplido en su totalidad pero tiene influencia en el resultado final.
- Demandada (7,5 puntos) – Importante característica que debe ser cumplimentada en el grado que sea posible, gran influencia en el resultado final.
- Crítica (10 puntos) – Característica crucial, la tarea no se puede desempeñar sin ella, es prácticamente excluyente en el resultado final.

Para obtener unos resultados satisfactorios los clientes deben limitar el número de características críticas y tratar de ser coherente con los requerimientos de la aplicación. Si se desea mayor peso a las categorías crítica y requerida basta modificar los puntos. Se ha escogido una escala decimal para hacerlo más intuitivo y estándar.

Segundo paso – Seleccionar los valores de las características.

La puntuación a los distintos valores también será intuitiva y similar a los baremos de prioridad. Se establecerán valores del 0%-100% (por ejemplo en entorno condiciones de laboratorio sería el valor ideal, un 100%, y un entorno muy duro sería la peor, un 0%). Los valores serán iguales a los anteriores con una horquilla entre 2,5 y 10 puntos (para hacer un máximo de 100, fácil y rápido a la hora de analizar los resultados).

El cliente seleccionará el valor (cualitativo) que mejor se ajuste a sus necesidades, remarcando la especial importancia de no escoger el valor ideal de una característica sin no es necesario (sobredimensionamiento y encarecimiento del sistema), ni valores inferiores a lo requerido (la tarea no se cumplirá satisfactoriamente).

La puntuación final se compondrá de dos partes: Cada valor de cada característica se empareja con una estructura metrología-producción óptima la cual satisface el valor sin estar sobredimensionada. Por otro lado cada característica puede ser cumplimentada parcialmente (proporcionar valores cercanos) por más de una estructura; este hecho se computará lo que se sumará a la puntuación final. Esta parte trata de hacer el método más robusto y penaliza la incapacidad de cumplir el requerimiento de una característica (la peor para cada caso). De este modo la estructura que cumpla completamente el valor computará doble y las estructuras que lo hagan parcialmente computarán solo una vez.

La estructura que obtenga una puntuación final mayor será la elección óptima, en caso de puntuaciones idénticas o similares, las características prioritarias deben ser estudiadas y a su vez considerar otros factores. Esos factores serán: las herramientas disponibles, la estructura de metrología y la formación actual, preferencias del cliente, planes futuros, tarea a desempeñar, espacios disponibles y la necesidad de tests destructivos.

Las características y los valores correspondientes a cada estructura que servirán de base para el modelo de decisión son las seleccionados en el apartado 3.1 dentro del nuevo modelo teórico (así se combina la terminología teórica con un modelo cuyas entradas provienen del mundo industrial no teórico). Cabe señalar que no existe una estructura que englobe todos los valores óptimos de las características sino que cada una tiene algún valor óptimo, valores intermedios y algún valor mínimo o peor (aquí se demuestra la importancia de una correcta elección de los valores por parte del usuario). En la tabla 3.5 se muestra la distribución de los valores de las características y las distintas categorías de relación entre metrología y producción. La distribución de colores es verde (ideal), azul (bueno), amarillo (regular) y rojo (malo). Las características y sus valores dentro del modelo de decisión están explicados más detalladamente en el Anexo II.3.

	Far off-line	Near off-line	In-line	In-situ
<b>Entorno</b>	Ideal (laboratorio)	Bueno	Medio	Muy duro
<b>Mantenimiento</b>	Intervalos largos no preventivo	Intervalos medios no preventivo	Intervalos cortos - poco mantenimiento preventivo	Mantenimiento preventivo
<b>Automatización</b>	No Automatizado	Poca automatización	Media - alta	Alta
<b>Control</b>	Basado el lotes (Control por lotes)		Basado en producto (control pieza a pieza)	Basado en producto (control tiempo real)
<b>Tiempo de respuesta</b>	Muy alto	Alto	Medio - bajo	Muy bajo
<b>Inversión</b>	Baja	Media - Baja	Media - alta	Alta
<b>Layout</b>	No integrada	Semi-integrada	3. Integrado	
<b>Tiempo de medición</b>	Muy alto	Alto	Corto	Muy corto
<b>Piezas analizadas</b>	Menos del 30%	30% - 60%	60% - 100%	90% - 100%
<b>Falsos positivos/negativos</b>	Producto – Excelente Global - regular	Producto – Buena Global - medio	Producto – Buena Global -bueno	Producto –Regular Global -regular
<b>Tolerancia</b>	Muy estrecha	Estrecha	Media	Amplia
<b>Robustez</b>	Muy alta	3. Alta	Media	Baja

Tabla 3.5: Relación valores de características y categorías metrología-producción.

## 4. Modelo de decisión para la optima selección del sistema de medición

Sistemas de medición sin contacto están siendo implementados como herramientas de metrología en la producción debido a sus posibilidades y a unos precios cada vez más competitivos. En el caso que nos ocupa se tratará la visión automática por cámara.

No existen métodos disponibles para un primer acercamiento a la implantación de los sistemas en la producción y para posteriormente recibir el “feedback” de información (la directiva VDI 2632 es una buena aproximación pero utiliza un lenguaje orientado a profesionales con experiencia o especializados en el campo). Por tanto es necesario un método sistemático que proporcione una primera selección, permitiendo al cliente obtener unos resultados preliminares y una fácil introducción a los parámetros y a las posibilidades técnicas.

En este capítulo se desarrolla un modelo de decisión que tratará de guiar en una primera aproximación a usuarios con escasos o nulos conocimientos especializados en el campo. Se hará de una forma intuitiva, con un campo de aplicación lo más amplio posible minimizando la necesidad de consulta a especialistas de campo y permitiendo adquirir un conocimiento que se transformará en beneficios importantes (mejor comunicación de las necesidades a los fabricantes, implantación más rápida y una primera selección o “criba”).

La selección del sistema de visión automática no es escoger la cámara simplemente, el sistema tiene múltiples componentes, cada uno de ellos con su importancia e influencia en el resultado final. Podemos dividir dichos componentes en dos grupos:

Equipo de hardware: Cámara (numero de cámaras, sensor, lente...), iluminación, ordenadores para procesar, extraer y almacenar la información, interfaz, componentes mecánicos y electrónicos (por ejemplo actuadores que desechen piezas erróneas), protecciones o alimentación de potencia.

Equipo de software: Filtros, algoritmos, programas de control que consiguen un mejor contraste y destacar las partes deseadas si la imagen no es lo suficientemente precisa.

Este modelo de decisión solo se centrará en la parte del equipo de hardware, debido a la gran cantidad de posibilidades de programas, filtros y algoritmos existentes para cada aplicación lo que dificulta su implementación en un modelo global. Los componentes electrónicos, mecánicos y la alimentación de potencia tampoco serán estudiados por su alta dependencia de la aplicación y por carecer de una complejidad importante en la mayoría de los casos.



## 4.1 Guía técnica

Esta guía técnica trata de dar a conocer al usuario las distintas opciones para cada componente, siendo una primera aproximación dentro del campo de visión sin contacto. Como resultado se limitará el número de posibles soluciones (primera selección), se aclararán las necesidades (facilitando intercambio de información cliente-fabricante e implantación) y se obtendrán una serie de recomendaciones para la óptima elección.

### 4.1.1 Cámara

Componente que debe ser cuidadosamente seleccionado ya que existen muchas posibilidades, parámetros y precios a tener en cuenta. Las siguientes páginas servirán de guía para aclarar las distintas posibilidades y cuales de ellas se ajustan mejor a las necesidades del usuario.

#### **1. Extracción de datos**

Conseguir tanta información como sea posible por parte del cliente (Anexo II.4 – guía de visión automática o desde la aplicación de Excel). Con la información obtenida se seleccionará los componentes y se establecerán los parámetros técnicos.

Tarea: Explicar la tarea para tener una idea lo más detallada posible (dimensiones, color, parámetros a medir o cualquiera otra información)

Producto: Tamaño, dimensión o detalle más pequeño a medir, forma, material, superficie, color...

Espacio: Disponibilidad de espacio, distancias de trabajo, seguridad, ergonomía...

Proceso: Alta velocidad requerida o no (tiempo medición), objeto en movimiento, posición de objeto constante, entorno (vibraciones, polvo...), entradas/salidas del control de proceso, distancias, layout...

## **2. Selección de características y componentes**

A continuación se muestran los parámetros y componentes más importantes de una cámara, así como sus distintas posibilidades.

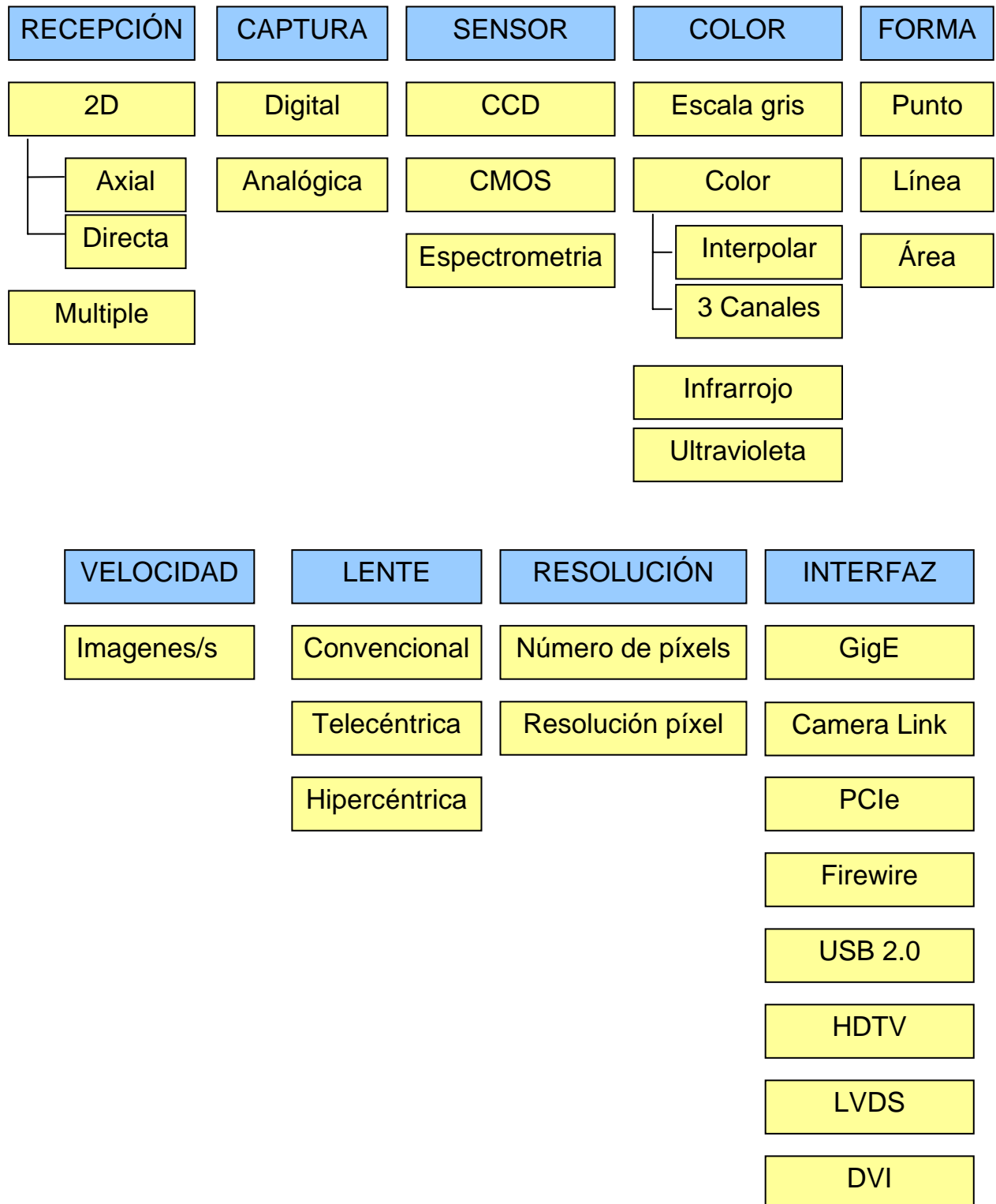


Figura 4.1: Características de la cámara. Fuente: [ORTH].

- Recepción: Depende de la aplicación en la mayor parte (necesidad de uno o más cámaras, sistema de referencia para medidas geométricas...), aunque también influye el espacio disponible (directo, axial). En caso de necesitar varias cámaras será necesario un marcado (láser, infrarrojo) que permita establecer el sistema de referencia común para ambas.
- Captura: En esta categoría en un primer análisis no se puede seleccionar una única opción (requiere un estudio en profundidad de la aplicación y las características), en general ambas son posible, aunque la captura digital se está imponiendo en el mercado.
- Sensor: Tradicionalmente CCD (Charge-Coupled-Device) era la opción más común pero la tecnología CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) esta siendo desarrollada y actualmente ambas pueden afrontar casi todas las aplicaciones (las diferencias para elegir una u otra requiere un análisis en profundidad). En cuanto a sus características CCD destaca en su tratamiento del ruido, su uniformidad y buenas características para contrastes bajos, mientras que CMOS destaca por su velocidad, flexibilidad y la necesidad de menos componentes y energía.
- Color: Depende de la tarea y si necesita diferenciar color. La escala de grises (8-10-12-16 bit por píxel) se usa cuando no se necesita diferenciar colores de forma precisa (solo por contraste, detección de tipo). Para diferenciar colores se usan cámaras de color (24 bit por píxel, con 3 canales, Rojo-verde-azul, o 32 bits incluyendo transparencia). Para tareas que requieran colores específicos se usa la espectrometría. Infrarrojos y Ultravioletas para aplicaciones especiales (tintas especiales, detección térmica...).
- Forma: Depende de la tarea y del objeto (geometría, superficie...). Si el objeto está en movimiento no es posible utilizar la cámara puntual. La diferencia entre las cámaras de área y lineales es la cantidad de datos que toman y su configuración y ambas son compatibles para la mayoría de aplicaciones.
- Resolución: Determina la precisión de la medida, siguiendo la regla de oro de la metrología la precisión de la herramienta debe ser al menos un décimo de la tolerancia. La resolución se determina para cada píxel. El numero de pixeles lo determina el tamaño del objeto y la resolución de cada píxel
- Velocidad: Se extrae del tiempo de medición (con 100 ms. necesitamos 10 imágenes por segundo). Si la pieza está en movimiento es más complejo y debe ser mucho más rápido ya que se mide en una parte del tiempo de medición, tomaremos un quinto como referencia.

Lente:

Las lentes se dividen en tres grupos: convencionales, telecéntricas y hipocéntricas. La diferencia entre ellas es la distorsión en la imagen final debida a la distancia entre objeto-lente (importancia si el objeto esta posicionado en una posición constante) explicada en la figura 4.2. Desde el punto económico las lentes convencionales son las más baratas.

Otros parámetros técnicos que no se incluyen en el modelo de decisión pero deben ser nombrados son:

- Distancia focal (f) – 
$$f = \frac{g \cdot S_h}{FOV_h + S_h}$$
  
 $f = (\text{distancia objeto-lente} \cdot \text{altura sensor} / \text{altura objeto} + \text{altura sensor})$
- Ventana de visión, montura (C-, CS-), número F (relación distancia focal/diámetro), material, iris (auto, video, motorizado), zoom (fijado, manual o motorizado), formato (1/2, 2/3, 1/3) ...

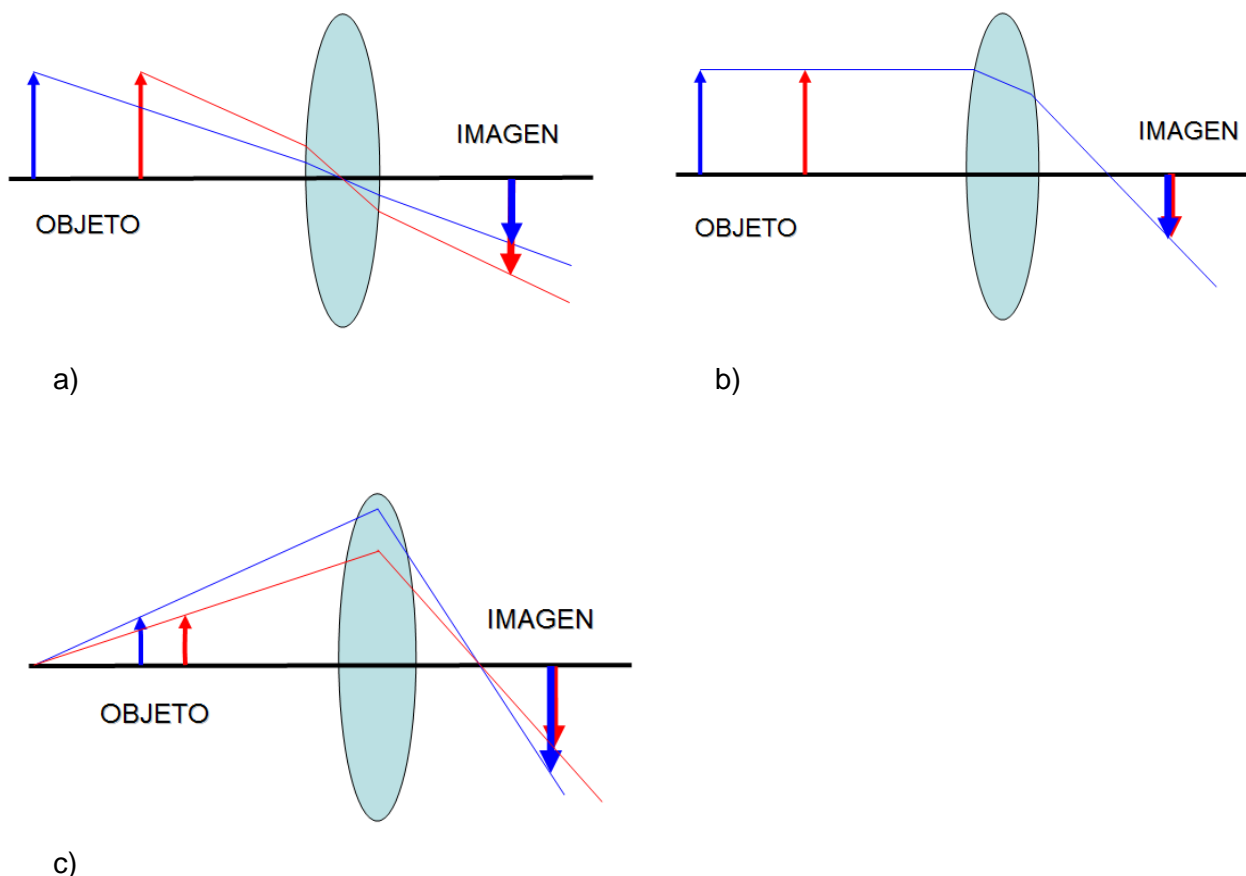


Figura 4.2: Problemas de distorsión en las lentes. Fuente: [HORN].

a) Convencional, b) Telecéntrica, c) Hipocéntrica

**Interfaz:**

Las características principales para seleccionar este componente son la longitud máxima (mejor opción GigE), transferencia de datos (relacionado con la velocidad, mejor opción Camera Link) y las conexiones disponibles en la compañía o sistema.

La tasa de transferencia se calcula:

Tasa de transferencia = pixeles(anchura) x pixeles(altura) x bit/píxel x imágenes/s x byte/8bits x Kb/1024 bytes x Mb/1024 Kb

Algunas posibilidades: Gigabit Ethernet (GigE), USB 1.0/2.0, DVI, PCIe, Firewire, Camera link, LVDS, HDTV y más antiguas como RS-170, RS-232, RS-422, PAL, NTSC, S-Video (no son comunes debido a sus limitaciones). Sus características están expuestas en las tablas posteriores.

	GigE	DVI	HDTV	USB 1.0	USB 2.0
Longitud max	100m	4,6m	12-15m	5m	5m
Datos	1000Mb/s	1,65Gb/s	1485Mb/s	12Mb/s	480Mb/s

	PCIe	Firewire	Camera Link	LVDS	RS-422
Longitud max	7m	4,5-100m	10m	10m	12m
Datos	250-500Mb/s	400-800Mb/s	3.6Gb/s	400Mb/s	10Mb/s

**Tabla 4.1: Transferencia de datos y longitud máxima para distintas interfaces.**

**Fuente: [SCHM09], [EXTR10].**

### 4.1.2 Iluminación

La iluminación tiene una importante influencia en la correcta interpretación de imágenes, debido a que reflejos, formas y sombras en la pieza pueden complicar el correcto reconocimiento de códigos, fallos u otros elementos. La iluminación proporciona imágenes más nítidas y resalta las características deseadas lo que facilita su análisis. Un único sistema de iluminación puede no ser suficiente y una combinación de varios resulta lo más recomendable para conseguir óptimas condiciones de brillo, color, contraste o longitudes de onda.

Los principales objetivos del sistema de iluminación son:

- Maximizar el contraste, remarcando las partes de interés del resto de la pieza para obtener una imagen lo más clara posible para analizarla y procesarla después.
- Proporcionar robustez a la medición, reduciendo la diferencia entre imágenes del mismo producto y reduciendo la influencia de cambios externos en el resultado como ruido (cambios en luz natural, vibraciones, encendido de luz artificial...).

#### **1. Extracción de datos**

Conseguir tanta información como sea posible por parte del cliente (Anexo II.4 – guía de visión automática o desde la aplicación de Excel). Con toda la información se seleccionará los componentes y se establecerán los parámetros técnicos.

Tarea: Explicar la tarea para tener una idea lo más detallada posible (dimensiones, color, parámetros a medir o cualquiera otra información)

Producto: Tamaño, forma, material, superficie, color...

Espacio: Disponibilidad de espacio, distancias de trabajo, seguridad, ergonomía...

Proceso: Alta velocidad requerida o no (brillo), objeto en movimiento, entorno (vibraciones, polvo...), presencia de otras fuentes de luz (protecciones)...

**2. Selección del sistema iluminación**

Características y sus distintos valores para la iluminación.

GEOMETRIA	FUENTE	COLOR	FORMA
TRASERA	LED	VISUAL	PUNTUAL
DIRECTA	XENON	BLANCO	ANGULAR
CAMPO OSCURO	FLUORESCENTE	INFRAROJO	ANILLO
	FIBRA ÓPTICA	ULTRAVIOLETA	LINEAL
DIFUSA	METAL HALÓGENO		DOMO
	SODIO ALTA PRESIÓN		CO-AXIAL
	LUZ NATURAL		LUZ TRASERA
	INFRAROJO		
	ULTRAVIOLETA		

**Figura 4.3: Características del sistema de iluminación. Fuente: [ORTH].**

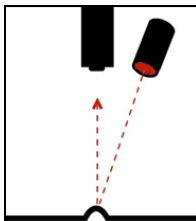
## Geometría

### Trasera



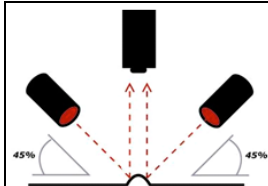
La luz proviene de la parte trasera del objeto y se enfrenta a la cámara, por lo que es una solución muy practica para limitar contornos, estudiar ejes, posición e incluso detectar poros o agujeros. Debe tenerse en cuenta que para aplicaciones de perfiles con distintos niveles, las piezas deben estar perfectamente alineadas para que el sistema sea recomendable.

### Directa



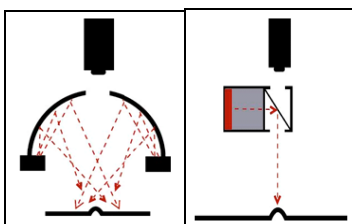
La luz se dirige directamente sobre la pieza lo que la excluye en piezas con superficie brillante o con problema de reflejos (formación de imágenes con “punto blanco”).

### Campo Oscuro



La luz se refleja en la superficie del objeto desde un ángulo de inclinación menor al  $45^\circ$  (evitando así puntos blancos), por lo que es recomendada para imperfecciones en superficie, con partes elevadas o grabadas hundidas.

### Difusa



La luz se proporciona de forma difusa, no directa lo que la hace recomendable en presencia de superficies transparentes, con gran rugosidad o contorno complejo. Para superficies curvas se recomienda el domo (izquierda) y para planas el co-axial (derecha).

**Figura 4.4:** Distintos tipos de geometría de sistemas de evaluación. Fuente: [DARY].



**Fuente**

	<i>Intensidad</i>	<i>Tiempo vida</i>	<i>Coste</i>	<i>Uniformidad</i>	<i>Longitud Onda</i>
Led	●●	●●●●	●●	●●●	●●
Xenón	●●●●	●●●●	●●●	●●●●	●●●
Fluorescente	●●	●●●	●	●●	●●
Fibra óptica	●●	●●	●●●●	●●●	●●
Halogenado metálico	●●●	●●●	●●●●	●●●●	●
Sodio alta presión	●●●●	●●	●●●●	●●●●	●●
Luz natural	●	●●●●		●	●●●●
Infrarrojo/Ultravioleta	●●●●	●●●	●●●	●●●●	●●●

Tabla 4.2: Características de las fuentes de iluminación. Fuente: [BRAG], [STOC].

La intensidad es crucial para aplicaciones que soliciten alta velocidad de medición o con piezas analizadas en movimiento (requiere pulsos). Las fuentes de infrarrojos y ultravioletas son usadas para tareas especiales.

**Color**

En caso de utilizar luz de colores se busca utilizar el color complementario a la pieza (así se obtiene mayor contraste). Si se busca luz transmitida es recomendable longitudes de onda grandes (rojo, infrarrojo) y bajas en caso de no interesar la luz transmitida (ultravioleta, azul).

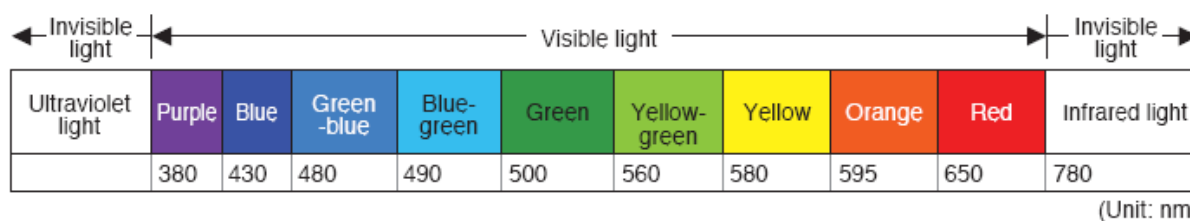


Figura 4.5: Espectro visual. Fuente: [KEYE]

### **Forma**

Depende de la aplicación, geometría y características del objeto (parte elevadas, superficie, brillo...). Cada geometría tiene una serie de opciones óptimas para ella; trasera (luz trasera), directa (punto, lineal), campo oscuro (anillo, angular), difusa (domo, co-axial).



**Figura 4.6: Diferentes formas de iluminación. Fuente: [KEYE, Vol.3]**

### **4.1.3 Protecciones**

Contaminación por luz ambiental: Tiene gran impacto especialmente con iluminación blanca. Posibles soluciones son filtros (eliminan longitudes de onda no deseadas), polarización (permite solo ciertas direcciones de luz), alto brillo, cerramientos.

Vibraciones, fuerzas: Sistemas de absorción de golpes, amortiguaciones o ensamblajes independientes.

Altas temperaturas – Sistemas de refrigeración, protecciones cerámicas, pantallas aislantes.

Polvo, virutas: Flujo de aire, mamparas de protección...

Protecciones eléctricas y de potencia: Las típicas de maquinaria o instalación eléctrica.

## 4.2 Selección final

### Información del proceso

En primer lugar se busca clarificar las necesidades del cliente, de modo que al final del modelo de decisión sean capaces de explicar claramente sus necesidades en la terminología apropiada (facilitando intercambio de información cliente – fabricantes). La información debe ser tratada con una serie de filtros, evolucionando desde preguntas cualitativas e intuitivas hasta un lenguaje más o menos técnico y especializado. Todo esto partiendo de la base que el usuario no tiene conocimientos avanzados en el campo.

En la aplicación informática (Anexo II.4) se extraerá información como:

- Definir las tareas de medición: Recoger información de la tarea global y siendo lo más específico posible sobre la tarea de medición (geometría, posicionamiento, detección...).
- Definir los parámetros y los objetivos que se buscan.
- Información del proceso (velocidad, layout, sistema actual, entorno...).
- Información del producto (dimensiones, material, superficie...).
- Información de la compañía (responsables, actual estructura producción, metrología...).
- Información de mercado (demanda del producto, ciclo de vida, competencia...)

A partir de la información relativa al campo de la visión automática en la guía técnica anterior los clientes pueden tener una idea más concreta de sus necesidades y las posibilidades existentes y pueden expresar sus necesidades con parámetros técnicos en mayor o menor medida. Los fabricantes tras recibir la información técnica (lista de requerimientos) proporcionarán una serie de modelos con distintas características y precios. El usuario utilizará las listas de evaluación para seleccionar la mejor opción bajo sus propias prioridades.

Lista de requiremientos (primera selección)

Basado en la formación extraída de la guía o la aplicación informática se constituirá una lista de requerimientos. Esta será lo más clara, específica y técnica posible, correspondiendo a la primera etapa del proceso de selección. Esta información será entregada a los fabricantes en una hoja de normalizada (tabla 4.3), básica para que los fabricantes comprendan de forma clara las necesidades del usuario y se provean de soluciones adecuadas.

Esta lista de requerimientos contiene las restricciones del proceso (económicas, tecnológicas, espaciales, temporales...), así como las características de los parámetros y componentes para cumplir la tarea (forma, dimensiones, resolución, entrada/salida, brillo...). También se incluye la prioridad o el peso de cada requerimiento (notar que alguna de ellos puede ser solo parcialmente cumplimentado). Se debe tener en cuenta la relaciones entre los distintos requerimientos, las dependencias entre ellos (normalmente al incrementar un parametro otro suele disminuir) y si se diera el caso las relaciones de causa-efecto.

Compañía		Lista requerimiento: Proyecto o nombre de proceso:	Fecha; Código; Pág.:
Fecha:		Requerimientos:	Peso
29-03-10		1. Geometría:  2. Forma  3. Precio  4. Otros...	De  D  C  D
		C – Requerimiento crítico D – Requerimiento demandado De – Requerimiento deseable	

**Tabla 4.3: Modelo de la lista de requerimientos. Fuente: [PAHL].**

Fabricantes (segunda selección)

Los fabricantes seleccionarán dentro de sus productos aquellos que cumplan en mayor medida la lista de requerimientos. Ofertarán los modelos junto con sus características y parámetros, permitiendo así compararlos entre sí.

Selección final

Se creará una lista de evaluación para cada modelo que proporcionen los fabricantes, y con ella se seleccionará la mejor opción. La selección será fácil y sobre todo clara y estructurada. Los parámetros para evaluar las opciones se extraen de las listas de requerimientos y se clasifican en tres categorías: crítica, demandado y deseable.

Proyecto o nombre de proceso:		Código:	Fecha:
Nº Modelo	Parámetros:		
Criterio Evaluación: Crítico	Valor	Rechazo	
		<input type="checkbox"/>	
	Total		
Criterio Evaluación: Demandado	Valor	Puntuación	
	Total		
Criterio Evaluación: Deseable	Valor	Puntuación	
		<input type="checkbox"/>	
	Total		

**Tabla 4.4: Lista de evaluación. Fuente: [PAHL].**

**Criterios de selección:**

1. Numero de rechazos – Todos los requerimientos críticos de ser cumplimentados, en caso de imposibilidad de cumplir todos los requerimientos críticos se escojera el que más requerimientos cumpla o el que los cumpla en mayor grado.
2. Puntuación máxima – Todos los requerimientos demandados tienen un importante peso en el resultado, el cliente evaluará los modelos y los puntuará de 0 al 10.
3. Numero de características deseadas – En caso del mismo resultado en los puntos anteriores, el que cumpla mas características deseadas será la opción óptima. Aunque en este punto las diferencias no son resolutivas.

## 5. Ejemplo de aplicación: Detectar impurezas y fallos en ranuras de tornillos

Para estudiar las ventajas y mejoras introducidas por el modelo de decisión, este es comprobado con un ejemplo de aplicación industrial real, siguiéndolo paso a paso.

### 5.1 Descripción de la aplicación

La compañía necesita controlar la ranura de pequeños tornillos (M2-M4) antes de su ensamblaje automático debido a la aparición en ellas de virutas y defectos, tales como rayones, desviaciones del eje o ranuras inclinadas (el actual sistema no las detecta). Estas imperfecciones no detectadas tienen un impacto alto en la calidad de producto ya que pueden producir cortocircuitos en el producto final, los cuales aparecen un tiempo después de que el producto empieza a ser utilizado por el usuario, dentro del periodo de garantía por lo que tiene un gran impacto económico y la confianza de los clientes en el producto se ve reducida. El objetivo por tanto es detectar esas imperfecciones y retirarlas antes de que sean incorporadas al ensamblaje del producto.

El cliente rellena la directriz creada (Anexo II.5), de la cual extraemos la información más importante.

Requerimientos prioritarios:

- Una tasa de falsos positivos/negativos realmente baja, la estimación del cliente es que sea como mínimo menor de cien partes por millón.
- El tiempo de medición es el disponible entre dos piezas consecutivas antes de su ensamblaje (trabaja a un ritmo de 200 tornillos por minuto lo que nos lleva a un tiempo por tornillo de 300 milisegundos).
- Todos los tornillos deben ser analizados (100% piezas).

Otras demandas:

- El cliente desea aprovechar en la medida de lo posible el tiempo de espera y transporte antes de la máquina de ensamblaje, teniendo la posibilidad de utilizar raíles o cualquier método de separación y orientación de los tornillos. No hay problemas de espacio.
- El cliente tiene preferencia por la metrología integrada debido a experiencias anteriores y dispone de un sistema de visión automática en la actualidad el cual no cumple con las necesidades de la tarea de forma eficiente.
- Los resultados no deben variar debido a condiciones del entorno o cambio de producción (robustez demandada). Reseñar que existe presencia de vibraciones debidas a la maquina de montaje.
- Se busca minimizar el coste.

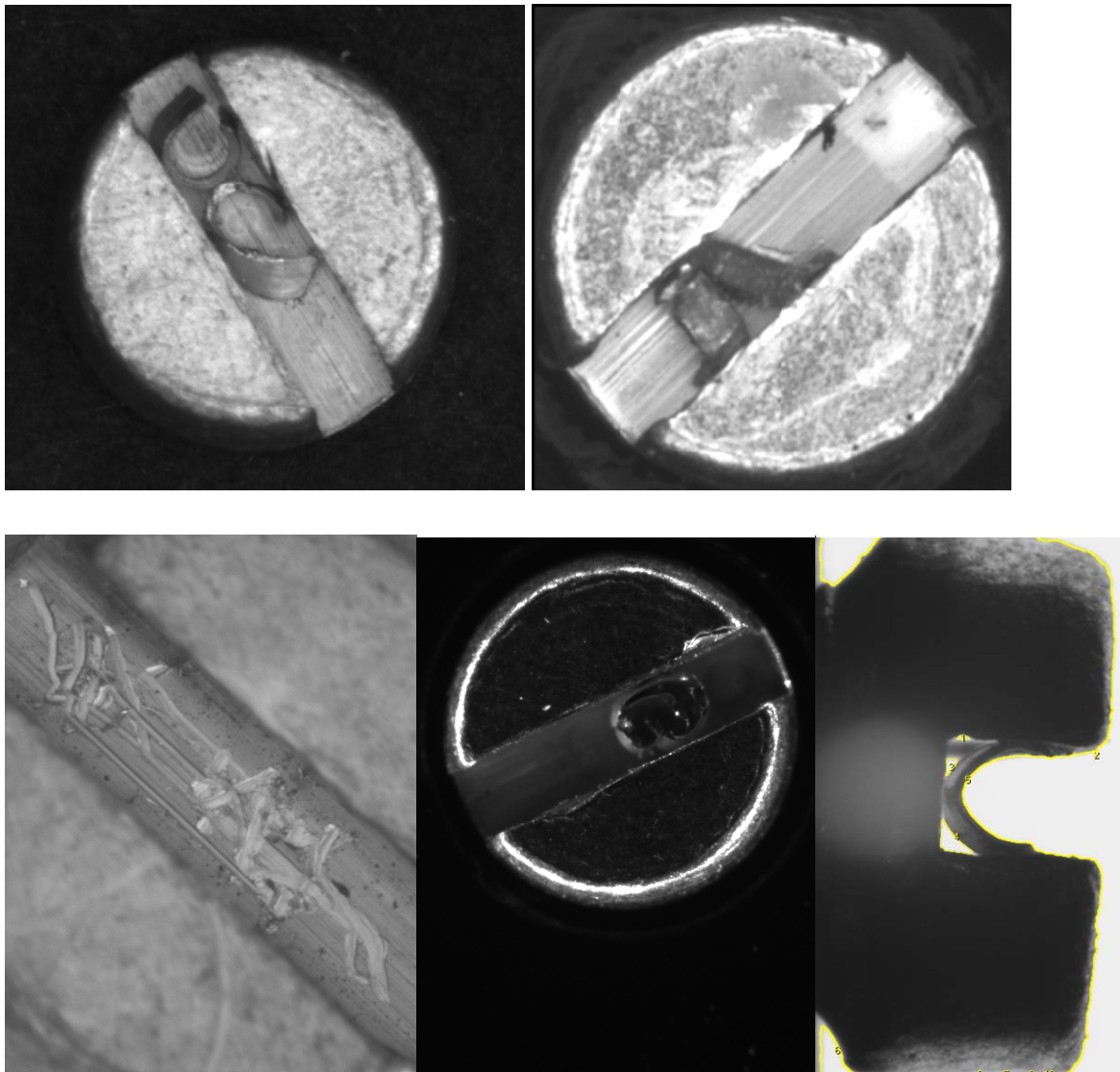


Figura 5.1: Ejemplos de defectos en la ranura de tornillos. Fuente: [WZL].

## 5.2 Aplicación del modelo de decisión

Comparamos los resultados extraídos del modelo de decisión con las decisiones tomadas en la aplicación real.

### 5.2.1 Selección de la estructura metrología-producción

En primer lugar elegimos la estructura que mejor se ajusta a la aplicación con el fin de conocer, los futuros puntos débiles y fuertes del sistema. Basándonos en las respuestas obtenidas del cliente tras rellenar el Anexo II.2 o la aplicación informática.

	Valor cualitativo	Valor	Prioridad	Puntuación Máxima
Entorno	Medio	2	2	50
Mantenimiento	Intervalos medios no preventivo	2	1	25
Automatización	Alto nivel de automatización	4	3	75
Control	Basado en el producto Pieza a pieza ("run-to-run")	2	3	75
Tiempo de respuesta	Medio-bajo	3	3	75
Layout	Integrado	3	3	75
Inversión	Media – alta	2	3	75
Tiempo medición	Muy rápido	4	4	100
Piezas analizadas	100%	4	4	100
Falsos positivos/negativos	Mínimo-bajo	4	3	75
Tolerancia	Muy estrecha	4	3	75
Robustez	Alta	3	4	100

**Tabla 5.1: Valores y prioridades de las características.**



En la tabla 5.2 se muestran los resultados obtenidos con los datos de la tabla anterior. Las puntuaciones son extraídas sobre un máximo de 1472 puntos y el número total de características es doce (con estos máximos se elaboran los ratios de la tabla 5.3).

	Puntuación	Número de características	Características prioritarias
In-line	1079	7	Falsos positivos/negativos, % piezas analizadas.
In-situ	868	4	Velocidad, % piezas analizadas.
Near off-line	479	2	
Far off-line	218	1	

**Tabla 5.2: Resultados del modelo de decisión.**

	In-line	In-situ	Near off-line	Far off-line
Ratio de características	<b>58%</b>	33%	17%	8%
Ratio de puntuación	<b>73%</b>	59%	33%	15%

**Tabla 5.3: Características y ratios de puntuación.**

En la siguiente tabla se muestran los resultados anteriores traducidos a porcentajes con el fin de hacer el análisis más intuitivo y comprensible.

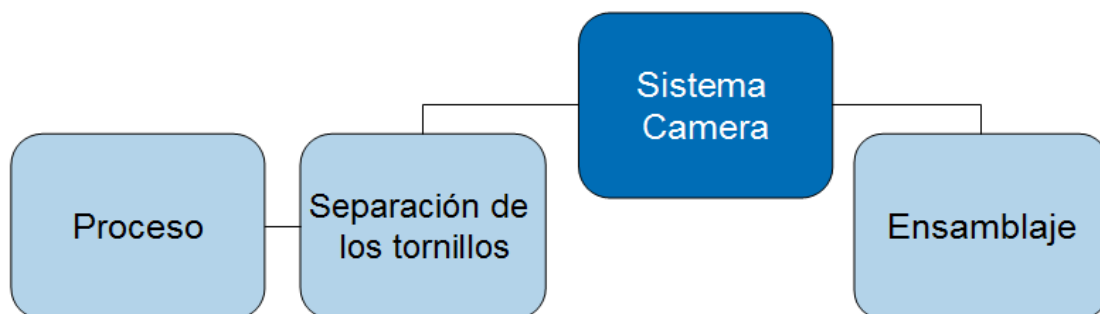
	In-line	In-situ	Near off-line	Far off-line
Porcentaje de características	<b>50%</b>	29%	14%	7%
Porcentaje de puntuación	<b>41%</b>	33%	18%	8%

**Tabla 5.4: Traducción de los ratios a porcentajes.**

Otras consideraciones:

- Presencia de cuello de botella antes del ensamblaje.
- No problemas de espacio.
- El cliente prefiere metrología integrada, (estructura previa: In-line).
- Experiencia con visión automática.
- Necesidad de retirar piezas con defectos (incluir actuador).

### **RESULTADO FINAL – ESTRUCTURA IN-LINE**



**Figura 5.2: Estructura In-line para la aplicación.**

### 5.2.2 Selección del sistema de medición

La primera selección trata de limitar las opciones, reduciéndolas en número y estableciendo una serie de opciones recomendadas para cada parámetro o componente.

#### **CAMARA**

##### 1. Extracción de datos:

Tarea: Controlar la ranura de tornillos para detectar virutas o fallos antes de ser automáticamente ensamblados.

Producto: Tamaño normalizado M2 (250µm x 250µm x100µm), también M2'5, M3, M4.

Forma - Ranura tornillo, niveles planos perpendiculares.

Material - Bronce o acero. Superficie recubierta con estaño o zinc.

Características de la superficie: Ejes abruptos, superficies planas y brillantes

Proceso: Velocidad rápida – 300 ms para la medición.

Objeto en movimiento y en constante posición (diferentes orientaciones de la cabeza del tornillo), con presencia de vibraciones y polvo.

Espacio disponible y de fácil acceso.

## 2. Selección de características y componente

<u>Recepción:</u>	No se necesita 3D y dadas las dimensiones del objeto con una sola cámara será suficiente. La óptima recepción se obtendrá con cámara axial (perpendicular al tornillo).
<u>Captura:</u>	Ambas perfectamente posibles.
<u>Sensor:</u>	Ambos posibles, la velocidad aconsejaría CMOS y la uniformidad y robustez CCD pero ambas pueden cumplir perfectamente los requerimientos.
<u>Color:</u>	Escala de grises (8-10-12-16 bit por píxel).
<u>Forma:</u>	Al estar la pieza en movimiento la forma puntual no es posible. Tanto la forma lineal como la forma de área cumple los requisitos.
<u>Resolución:</u>	<p>La dimensión más pequeña es 100 <math>\mu\text{m}</math> (M2), siguiendo la regla de oro, la resolución debe ser la décima parte, por tanto 10<math>\mu\text{m}</math>/píxel.</p> <p>Número de píxeles: La dimensión máxima del objeto es 5mm (M4) y la resolución 10 <math>\mu\text{m}</math>, por lo que el número de píxeles debe ser al menos 500x500 (una medida estándar es 800x600).</p>
<u>Velocidad:</u>	El tiempo de medición máximo es 300 ms por lo que se necesitan al menos 4 imágenes/s. Al hallarse el objeto en movimiento se toma en una fracción de ese tiempo, tomamos como primera aproximación un quinto, obteniendo así una velocidad necesaria de 20 imágenes por segundo.
<u>Lente</u>	El objeto se halla siempre en una posición constante por lo que la distorsión no es un problema. Todas las opciones son posibles pero la lente convencional es la recomendada por su simplicidad y bajo coste.
<u>Interfaz</u>	No existen datos sobre longitud del cable pero podemos desechar los cables muy cortos. Sin embargo necesitamos una tasa de transferencia de al menos 2Mb/s. Nos centramos solo en GigE, CameraLink, PCIe, Firewire, USB2.0, HDTV, LVDS.

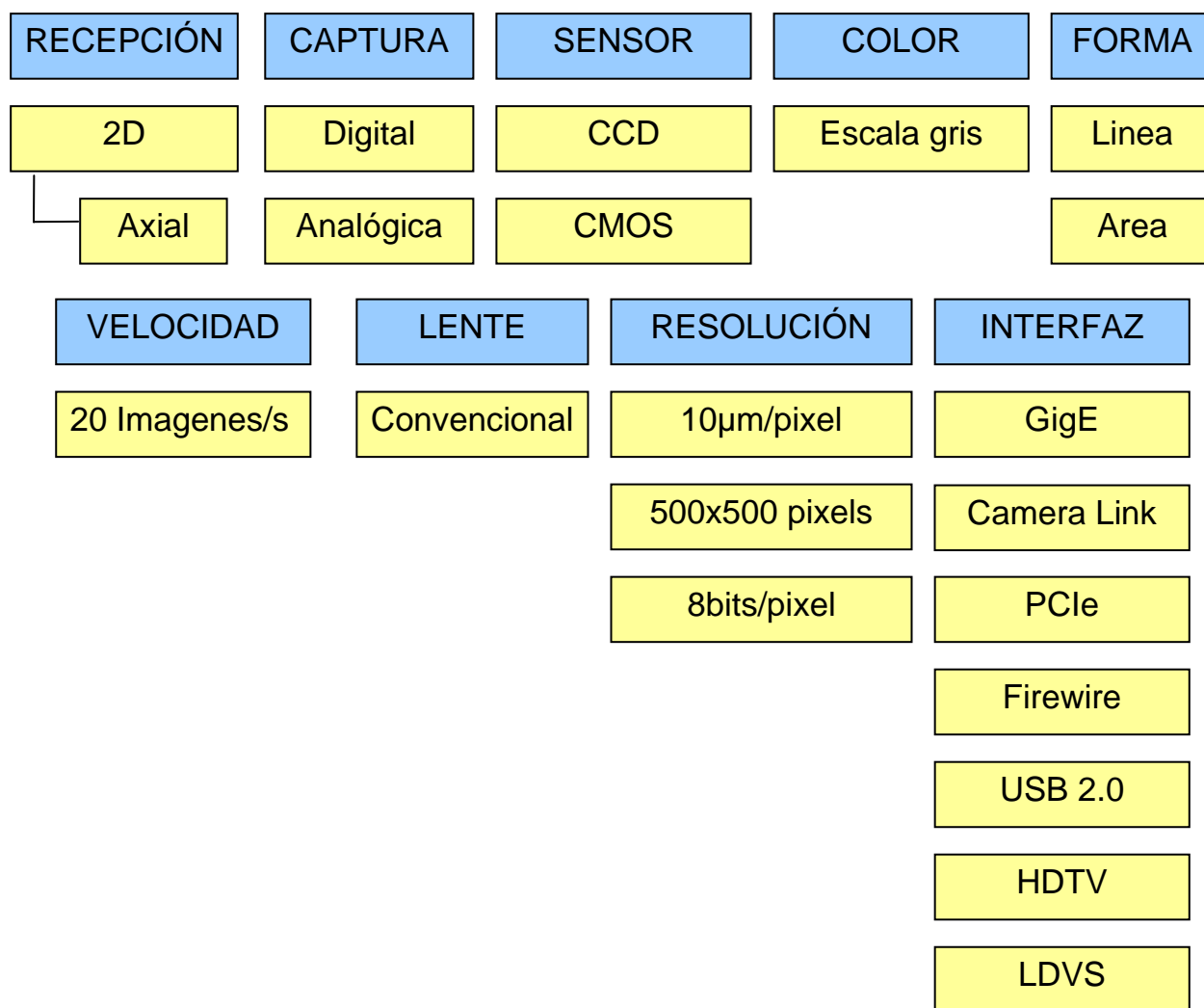


Figura 5.3: Características y componentes de la cámara para la aplicación.

## ILUMINACIÓN

### 1. Extracción de datos:

Tarea: Controlar la ranura de tornillos para detectar virutas o fallos antes de ser automáticamente ensamblados.

Producto: Mismas características que para la cámara, cabe reseñar en este apartado que la superficie es metálica y refleja produciendo puntos blancos.

Proceso: Velocidad rápida – 300 ms para la medición (necesidad pulsos y alta intensidad)

Contaminación ambiental presente (incrementar intensidad).

Espacio disponible y de fácil acceso.

Reflectividad – Mixta (difusa y especular)

2. Selección del sistema de iluminación

<u>Geometría</u>	Puntual no posible debido a la creación de puntos blancos por el reflejo (superficie brillante metálica) y geometría trasera requeriría una orientación perfecta de cada tornillo. Las geometrías difusa o campo oscuro son perfectamente posibles.
<u>Forma:</u>	Anillo o angular (campo oscuro); Co-axial, Domo (difusa); luz trasera (trasera). Lineal no recomendada al existir mejores opciones para difusa y campo oscuro, la puntual no posible debido al reflejo
<u>Fuente:</u>	Xenón y Led cumple de manera amplia los requerimientos del sistema. Opciones como halógenos metálicos, sodio de alta presión, fibra óptica... encarecen el sistema de forma innecesaria, mientras que fluorescente no es recomendado por su falta de uniformidad y el reflejo que produce.
<u>Color:</u>	Blanco y colores son las opciones recomendadas. Las demás o no son necesarias o no cumplen los requisitos.

GEOMETRIA	FUENTE	COLOR	FORMA
DIFUSA	LED	VISUAL	ANILLO
CAMPO OSCURO	XENON	BLANCO	ANGULAR
			CO-AXIAL
			DOMO

Figura 5.4: Características del sistema de iluminación requeridas.

**SELECCIÓN FINAL**

Compañía		Lista requerimiento: CÁMARA	Fecha; 29-03-10
		Proyecto o nombre de proceso: Ranura Tornillo	Código; RT   Pág.: 1
Fecha:		Requerimientos:	Peso
29-03-10	1. Geometría: Sin restricciones.	De	
	2. Forma – Linear o área	D	
	3. Captura – Analógica o digital	D	
	4. Recepción: CCD o CMOS	D	
	5. Color: Mono, escala de gris	D	
	6. pixeles: Resolución al menos 10µm	C	
	Sensor al menos 500x500	C	
	Bits/píxel: 8-16	C	
	7. imágenes/s mayor 20	C	
	8. Lente	C	
	9. Interfaz: al menos 200Mb/s	D	
	10. Precio	D	
		C – Requerimiento crítico D – Requerimiento demandado De – Requerimiento deseable	

**Tabla 5.4: Lista de requerimientos de la cámara.**

Compañía	Lista requerimiento: ILUMINACIÓN Proyecto o nombre de proceso: Ranura Tornillo	Fecha; 29-03-10 Código; RT Pág.: 2
Fecha:	Requerimientos:	Peso
29-03-10	1. Geometría: Difusa o campo oscuro 2. Forma: Anillo, angular, domo o co-axial. 3. Fuente: Led o Xenón 4. Color: Blanco u otro color 5. Brillo: Alto (con pulsos – objeto en movimiento) 6. Uniformidad: alta 8. Tiempo de vida: alto 9. Precio: bajo 10. Dimensiones: Sin restricciones	C D D D C D D D De
		C – Requerimiento crítico D – Requerimiento demandado De – Requerimiento deseable

Tabla 5.5: Lista de requerimientos para iluminación.



## 5.3 Validación

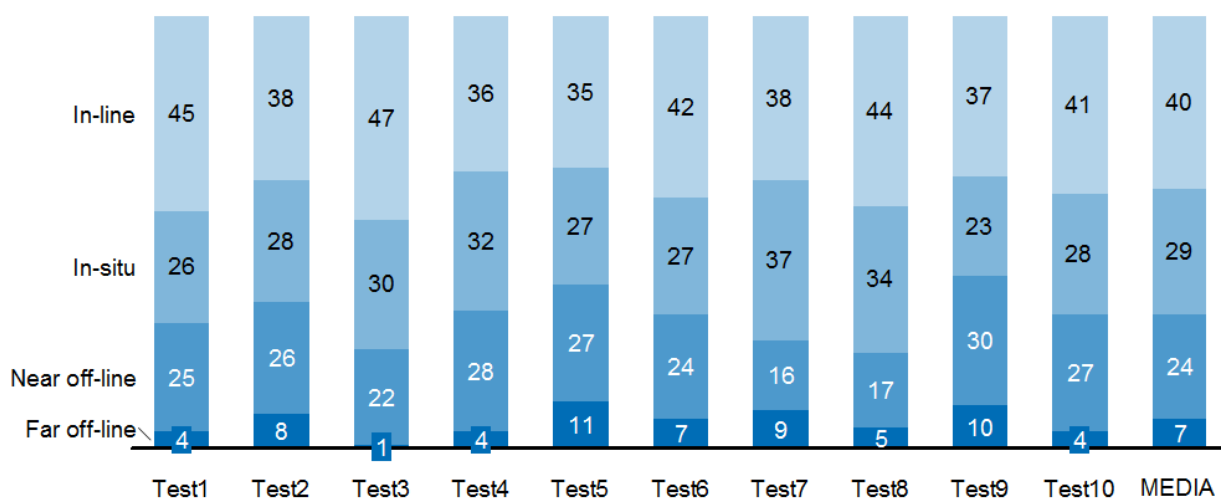
El resultado del modelo de decisión debe ser analizado, para evitar fallos y mejorarlo, haciéndolo más intuitivo y completo para futuras aplicaciones. El actual modelo abarca un amplísimo campo de aplicación por lo que puede ser demasiado específico para algunas aplicaciones y faltarle detalles para otras. Lo que se busca es intentar ajustarlo a cada aplicación sin perder su carácter global, hecho que solo se consigue tras numerosos test y comparaciones con resultados reales. En esta validación se compara las decisiones que se tomaron y las que se habrían tomado usando el modelo de decisión.

### 1. ESTRUCTURA

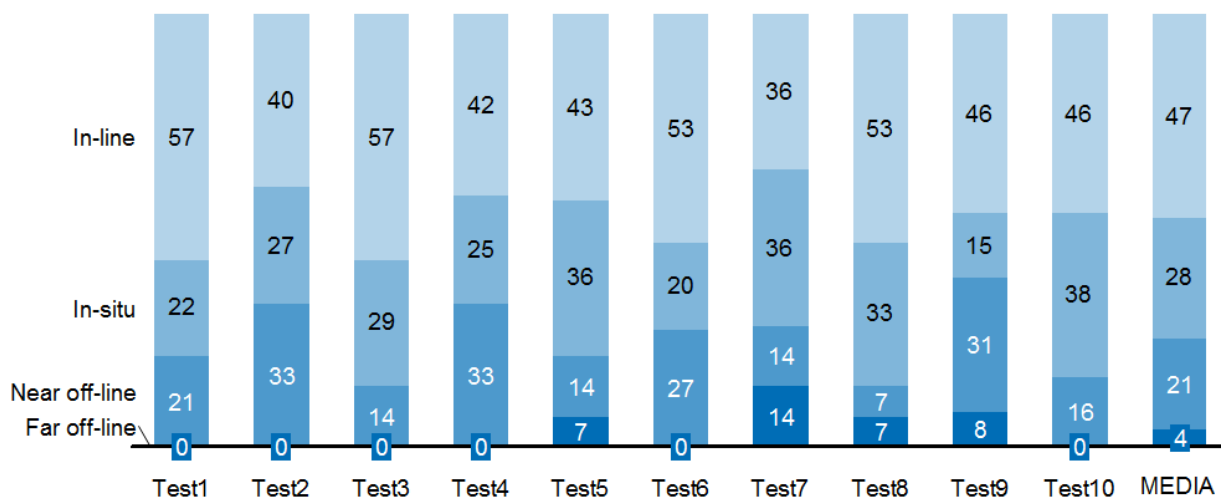
En la aplicación real la metrología fue implantada como un paso más en la línea de producción (**estructura in-line**), debido a la posibilidad de usar el tiempo de espera en la alimentación de la máquina de ensamblaje.

El resultado del modelo de decisión coincide con el tomado en la realidad. Las ventajas principales del modelo son la facilidad a la hora de tomar la decisión y las razones teóricas que la sustentan, así como la posibilidad de conocer las diferencias con las otras estructuras (Tabla 5.2), sus puntos fuertes y sus puntos débiles. La estructura seleccionada tiene una puntuación del 41% seguida por la estructura in-situ con un 37% (lo que demuestra que el nivel de metrología integrada es el óptimo, con un 78%).

Al no existir una gran diferencia entre los valores de las estructuras in-line e in-situ se recurrió a plantear la aplicación real a un grupo de ingenieros que manipularían los datos de entrada del modelo de decisión (en el papel de cliente). Estos ingenieros fueron escogidos como si fueran una muestra de usuarios potenciales, cuyos conocimientos de la teoría metrología-producción y de los sistemas de visión abarcaban desde un nivel medio a un total desconocimiento. Los resultados se obtuvieron de forma independiente y no podían ser consultados hasta que el modelo de decisión estableciera el resultado. De esta forma establecemos una primera aproximación de la robustez del sistema y la variación de resultados según el usuario que lo emplee (obviamente con un margen amplio de mejora si utilizáramos más aplicaciones reales y más tests).

**Resultados:****Figura 5.5: Diferentes puntuaciones para cada estructura.**

Los resultados muestran de manera clara que la metrología dominante es la integrada dentro de la producción (in-line o in-situ), siendo importante la diferencia entre las dos categorías. Los resultados arrojan que el 100% de los usuarios escogería como decisión final la estructura in-line. Sumando las estructuras de metrología no integrada se obtiene de media un 31% de puntuación en total, por debajo de los valores de la categoría in-line.

**Figura 5.6: Porcentaje de características completadas por cada estructura.**

La figura anterior muestra el porcentaje de características completadas con éxito por cada estructura y los resultados apoyan lo suscrito anteriormente en las puntuaciones. Solo el 25% de las características no son completamente satisfechas por la metrología integrada (se reduce a un 8% en caso de que incluir el cumplimiento parcial).

Comparando la media de los resultados del grupo de ingenieros con los resultados del cliente, podemos observar que son prácticamente coincidentes.

	Cliente	Media grupo
Puntuación in-line	41%	40%
Características in-line	46%	47%

**Tabla 5.6: Comparación de resultados.**

### **Análisis de los resultados:**

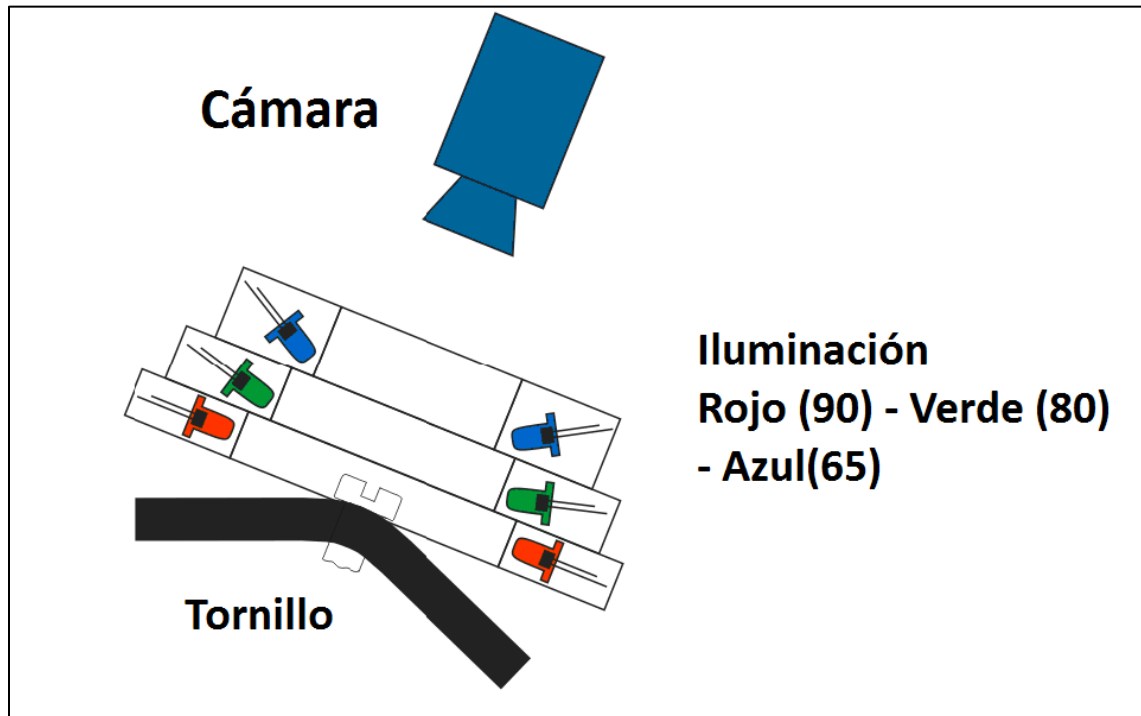
El resultado muestra que la opción escogida sin usar el método y usándolo es la misma, y no se ve afectada significativamente por el uso de distintos usuarios, una vez los requerimientos de la aplicación son conocidos. Un mejor conocimiento por parte del usuario de la teoría y requerimientos de la aplicación y un mayor banco de pruebas del modelo lo harán más robusto y fiable de cara a futuras consultas.

### **Puntos débiles:**

El mayor problema sigue siendo traducir de un modo fiel las necesidades reales del cliente al modelo, ya que en algunas características pueden tener un nivel de detalle muy específico y difícil de decidir y otras un rango muy amplio de valores dando lugar a errores de selección. Otro punto débil es la falta de ajuste por parte del usuario a sus necesidades, ya que rara vez escoge el peor valor (que en algún caso cumpliría el requerimiento) o no escoge la opción “no importante” en la prioridad, esto se debe a que el cliente lo asocia con un empeoramiento de las características del sistema, lo cual conviene ser explicado con anterioridad.

## **2. VISIÓN AUTOMÁTICA**

Resultado aplicación real:



**Figura 5.7: Aplicación real. Fuente: [WZL].**

### **Cámara**

Resultado aplicación real:

El cliente adquiere una nueva cámara la cual cumple los requisitos de la aplicación.

### **Modelo de decisión**

Cámara disponible del anterior sistema es perfectamente compatible con la aplicación (se conoce de antemano). Ahorro del total del coste de inversión. Las características extraídas del modelo de decisión son:

Resolución (10µm/píxel), número píxeles (superior 500x500), bits por píxel (escala gris, mayor de 8 bits), más de 20 imágenes/s, lente (convencional o telecéntrica), interfaz (transferencia de datos mayor de 2 Mb/s).

### **Iluminación**

Resultado de la aplicación real:

El cliente adquiere un nuevo sistema de iluminación, tras realizar tests con las distintas posibilidades. El nuevo sistema consta de tres anillos Led con geometría de campo oscuro, en tres colores distintos, rojo (90% inclinación), verde (80%) y azul (65%).

Modelo de decisión:

El modelo limita las posibilidades a las siguientes (eliminando los costes de los diferentes tests):

- Posibles geometrías (**campo oscuro**, difusa); Fuentes recomendadas (xenón, **led**); Color (**visual**, blanco); Forma (domo/co-axial, angular/**anillo**). Luz directa no posible.

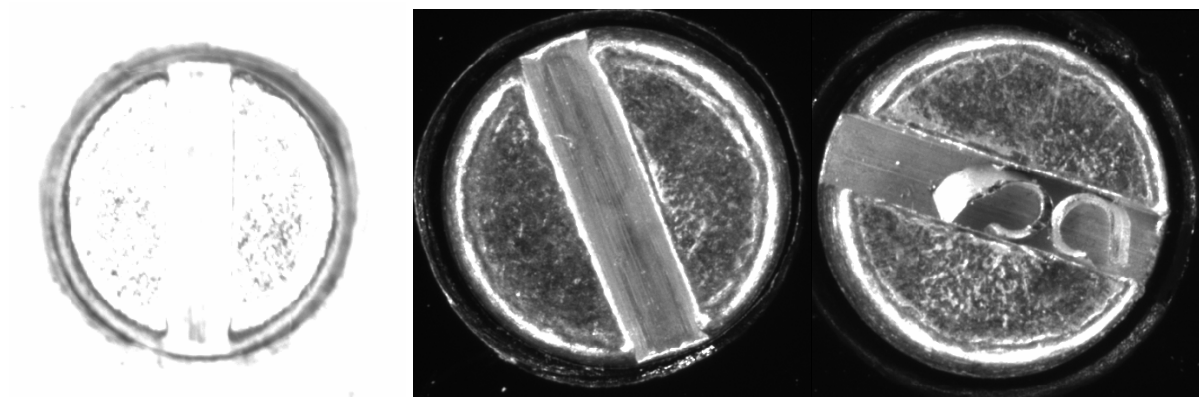


Figura 5.8: Distintos resultados. Fuente: [WZL].

Problemas con luz directa (izquierda) y la solución escogida (centro y derecha)

## 6. Resumen y conclusiones

Este trabajo proporciona una clasificación modificada de la relación metrología-producción, basada en diversas alternativas teóricas, literatura especializada y en un estudio de mercado en la feria internacional Vision 09 en Stuttgart. La clasificación propuesta está sustentada en un estudio teórico-práctico de las diferentes características y la influencia en ellas según se estructure la metrología dentro de la producción.

Basado en esta clasificación teórica, se desarrolla un modelo de decisión acompañado de una pequeña aplicación informática. Este modelo de decisión permite un rápido y cómodo traslado desde el mundo industrial y las necesidades del cliente, a la terminología y clasificación teórica. De igual modo en sentido contrario, facilitando la comprensión de la parte teórica. El modelo de decisión ha sido probado por un grupo de ingenieros con una aplicación real cuyo objetivo era detectar virutas e imperfecciones en la ranura de pequeños tornillos, obteniendo unos resultados satisfactorios.

Una vez que la relación metrología-producción ha sido establecida, se procede a establecer una primera aproximación a la visión automática (tecnología específica de medición sin contacto). En este punto se extraen las necesidades del cliente a través de una directiva o desde la aplicación informática (de forma cualitativa e intuitiva). Con esa información se desarrolla una lista de requerimientos para la cámara, sistema de iluminación y protecciones. De este modo clientes con un conocimiento básico o nulo en esta tecnología, son capaces de expresar de forma concisa sus necesidades e incluso plasmarlas en un lenguaje técnico especializado sin esfuerzo, tras una breve lectura de la guía técnica.

Los beneficios económicos inmediatos son un ahorro en costes al reducir los ensayos de comprobación (el cliente limita las opciones al fabricante tras un primer proceso de selección), e incluso importantes reducciones de la inversión en nuevos componentes, al cumplir los recursos actuales tras realizarles alguna modificación las necesidades de la nueva aplicación (como ha quedado demostrado en la aplicación real estudiada). Otros beneficios importantes son el ahorro en tiempo empleado y un incremento de la calidad de información cliente-fabricante de los componentes (cámara, iluminación y protecciones). La información técnica y el conocimiento extraídos pueden ser realmente útiles en futuras decisiones.

El trabajo de este proyecto puede ser completado con estudios futuros y mejorado ampliando el número de las aplicaciones de medición sin contacto (fotogrametría, medición sin contacto de alto rango, láser por triangulación, digitalización para ingeniería inversa y prototipado rápido...). El trabajo deberá incluir a posteriori la información extraída tras su uso (problemas del cliente, interpretación de términos errónea...). El sistema puede ser ampliado al enlazarlo con programas expertos de la materia tales como RP o incluyendo bases de datos de productos y componentes. Su impacto en la empresa puede ser más detalladamente estudiado con un análisis modal de fallos y efectos (AMFE)

Concluyendo esta metodología trata de tener un amplio campo de aplicación, no busca ser una selección detallada y resolutive para cada aplicación o establecer listas de requerimientos técnicos completamente detalladas (requeriría un conocimiento elevado sobre la materia). Sus objetivos finales son el establecimiento de la óptima estructura metrología-producción y clarificar las necesidades del cliente, guiándolo desde la formulación del problema hasta unas conclusiones finales que establezcan parámetros técnicos y un número de posibilidades disponibles para cada componente.





## Bibliografia

- [ALRA10] Machine Vision Cameras. Alrad, Newbury, Berkshire.  
URL: <http://www.alrad.co.uk/imaging/FAQ-Machinevisioncameras.html>  
[State: 15.03.2010]
- [BRAG99] Braggins, D.: Illumination for Machine Vision, Sensor Review. ``Innovations in illumination for machine vision". In: UK Industrial Vision Association's annual general meeting, Nottingham, UK, September 1999.
- [CARD04] Card, J.; Cao, A.; Chan, W.; Martin, B.; Lai, Y.: Relationship between in-situ information and ex-situ Metrology in Metal Etch. In: AEC/APC Symposium. Asia 2004.
- [DALS10] CCD vs. CMOS. Dalsa, Waterloo, Ontario, Canada.  
URL: [http://www.dalsa.com/corp/markets/CCD\\_vs\\_CMOS.aspx](http://www.dalsa.com/corp/markets/CCD_vs_CMOS.aspx)  
[State: 15.03.2010].
- [DARY07] Martin, D.: A Practical Guide to Machine Vision illumination Parts I-II-III.  
National Instrument Developer Zone  
URL: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6901> [Stand: 03.03.2010]
- [DESI10] CMOS or CCD for Machine Vision. Design News, Waltham, MA. URL:  
[http://www.designnews.com/article/11295-CMOS\\_or\\_CCD\\_for\\_Machine\\_Vision\\_.php](http://www.designnews.com/article/11295-CMOS_or_CCD_for_Machine_Vision_.php) [Stand: 15.03.2010].
- [DIEB95] Diebold, A.: Metrology Roadmap: A Supplement to the National Technology Roadmap for Semiconductors. Sematech. Austin, Texas. 25 January 1995.
- [DIRE01] Directive VDI/VDE 2632 Blatt1/Part 1. Industrial image processing – Definition of requirements for image processing systems. June 2001
- [dRON05] de Ron, A.J.; Rooda, J.E.: Equipment Effectiveness: OEE Revisited. In: IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. Vol. 18, Number 1. February 2005.
- [DURA05] Durakbasa, M.N.; Osanna, P.H.; Afjehi-Sadat, A.; Samarawickrama, D.; Krsek, A.: Application of Sophisticated Production Metrology and Nanometrology for Quality Control in Bio-Engineering. In: Measurement Science Review, Volume 5, Section 2, 2005.

- [EXTR10] Somers, S.: Demystifying Cables and Connectors for Digital Formats Part 1-2. Extron Electronics Europe, Amersfoort, the Netherlands. URL: <http://www.extron.com/company/> [State: 22.03.2010].
- [FANG10] S. J. Fang, T. H. Smith, G. B. Shinn, J. A. Stefani and D. S. Boning.; Advanced Process Control in Dielectric Chemical Mechanical Polishing (CMP); In: Universia Biblioteca: URL: <http://biblioteca.universia.net/> [State: 28.01.2010]
- [GONZ08] Gonzalez, R.C.; Wood, R.E.; Digital Image Processing, Third Edition. Ed New Jersey: Prentice Hall, 2008.
- [HAMA10] 2009 Worldwide Industrial Camera Directory. Machine Vision and Image Processing, Industrial Camera Directory, Hamamatsu. Opto IQ. URL: <http://downloads.pennnet.com/pnet/surveys/vsd/0911vsd-cameradir.pdf> [State: 15.03.2010]
- [HORN06] Hornberg, A. (editor); Handbook of Machine Vision. In: Vision Magazin 1/2006. Wiley Vch, 2006.
- [INFI03] Inficon.: Integrated Process Monitoring for Sputter Etch Clean Using a Stiletto IPM Particle Detection System. New York, 2003.
- [INTE07] International Technology Roadmap for Semiconductors 2007 edition.
- [INTE10] LVDS Bus. URL: [http://www.interfacebus.com/Design\\_Connector\\_LVDS.html](http://www.interfacebus.com/Design_Connector_LVDS.html) [State: 24.03.2010].
- [JÄHN05] Jähne B.; Beitz, W.; Digital Image Processing, Sixth Edition. Ed Berlin: Springer Verlag, 2005.
- [KEYE08] Keyence.: Machine Vision Academy, Vol 1-9. Keyence Corporation. Nuevo Leon, Mexico, 2008.
- [KUNZ07] Kunzmann H.; Pfeifer T.; Schmitt R.; Schwenke H.; Weckenmann A.; Productive Metrology – Adding Value to Manufacture. In: Annals of the CIRP, Vol. 54/2, 2005.
- [LAMR01] Lam Research.: Lam Research Corporation Announces Integrated Metrology Program For CMP. Fremont, 15 October 2001.

- [LDAN98] L. Dance, D.; A. Rosenthal, P.; Aarts, W.: Estimating the Costs, Benefits, and Return on Investment of Integrated Semiconductor Process Metrology. In: Meeting of the Integrated Measurement Association. Vail Colorado, 15 October 1998.
- [MEDE01] Medea+: New metrology methods measure up to tomorrow's IC technology. Paris, 2001.
- [ÖCHS04] Öchsner, R.: Semiconductor Manufacturing Equipment, Materials and manufacturing methods "Flexible APC in Semiconductor Manufacturing". In: IISB 6<sup>th</sup> Annual Conference. Erlangen, 4 November 2004.
- [ORTH08] Orth, A.: Entwicklung eines Bildverarbeitungssystems zur automatisierten Herstellung faserverstärkter Kunststoffstrukturen. Aachen: Shaker, 2008
- [PAHL99] Pahl G.; Beitz, W.; Engineering Design: A systematic Approach, Second Edition. Ed London: Springer Verlag, 1999.
- [PFEI02] Pfeifer T.; Production Metrology. Ed Aachen: Oldenburg, 2002.
- [WZL06] Orth, A.; Damm, B.E.: Machbarkeitsstudie und Umsetzungskonzept für die Entwicklung eines Optischen Prüfsystems zur Spankontrolle in Schraubenschlitten. WZL (Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement), RWTH Aachen 2006.
- [PING01] PingHsu, C.; Sunny, W.; Junshien. L.: Virtual Metrology: A solution for Wafer to Wafer Advanced Process Control. In: IEE International Symposium, Semiconductor Manufacturing. 8-10 October, 2001.
- [PROP08] Property right. United States Patent US 7,359,759 B2. Cheng, C.Y.; Fu, H.; Wang, F.; Cheng, F.: Method and System for Virtual Metrology in Semiconductor Manufacturing. 15 April 2008.
- [PROP09] Property right. United States Patent US 7,603,328. Cheng, F.; Huang, H.; Kao, C.: Dual-Phase Virtual Metrology Method. 13 October 2009.
- [ROOD07] Rooda, J.E.; de Ron, A.J.: Performance of Workstation with Offline and Integrated Metrology. In: IEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Vol 20, 2 May 2007.
- [RUBL03] W. Rubloff, G.; Aarts, W.: In-Situ Metrology: the Path to Real-Time Advanced Process Control. In: International Conference on Characterization and Metrology for ULSI Technology. Austin, 24-28 March 2003.

- [SCHE04] Schellenberger, M.: Equipment, Materials and manufacturing methods "Integrated Metrology for Advanced Process and Equipment Control". In: IISB 6<sup>th</sup> Annual Conference »Semiconductor Manufacturing«. Erlangen, 4 November 2004.
- [SCHM06] Schmitt, R.; Moenning, F.: Ensure Success with Inline-Metrology. In: XVIII Imeko World Congress »Metrology for a Sustainable Development«. Rio de Janeiro, Brazil, 17-22 September 2006.
- [SCHM08] Schmitt, R.; Damm, B: Prüfen und Messen im Takt. In: QZ September, 2008.
- [SCHM09] Schmitt, R.; Damm, B: Bilaufnahmestrategie – Prüfmerkmale sichtbar machen. In: Basisseminar Fertigungsintegrierte Bildverarbeitung. Aachen, 20 October, 2009.
- [SCHM10] Schmitt, R.; Lose, J.; Harding, M.: The Management of Measurement Processes - Key to Robust and Cost Optimal Production of High Quality Products. In: CAFMET International Metrology Conference. April 2010.
- [SIAU06] SIAutomation. Besnard, J.; J. Toprac, A.: Wafer-to-wafer virtual metrology applied to gate critical dimension run-to-run control in high volume manufacturing. Montpellier, 2006.
- [SMIT99] Smith, T.H.; Fang, S.J and others. On-line patterned wafer thickness control of chemical-mechanical polishing. American Vacuum Society. 3 May 1999.
- [SPAN01] Spanos, C.J.; Payman, J.; Leachman, R.C.: The Economic Impact of Choosing off-line, inline or insitu Metrology Deployment in Semiconductor Manufacturing. In: IEE International Symposium, Semiconductor Manufacturing. 8-10 October, 2001.
- [STAN07] Stanley, K.J.; Stanley, T.D.; Maia J.: Realizing 300mm Fab Productivity Improvements through Integrated Metrology. In: Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference.
- [STOC07] Martin, D.: Optimizing Illumination for linescan Vision Systems. Stockeryale, Salem NH. URL: [http://www.stockeryale.com/i/leds/products/cobra\\_wp.pdf](http://www.stockeryale.com/i/leds/products/cobra_wp.pdf) [State: 08.03.2010]
- [THOM10] Smart Camera Integration in Machine Vision System. ThomasNet, Salem NH. URL: <http://www.thomasnet.com/articles/automation-electronics/smart-camera-machine-vision-system> [State: 15.03.2010]

- 
- [UKIV97] Machine Vision Handbook. UK Industrial Vision Association. Royston, Herts UK. January 2007. URL: <http://www.emva.org> [State: 22.03.2010].
- [VISI09] 22nd International Trade Fair for Machine Vision and Identification Technologies. Stuttgart. 2009